

Untersuchungen räumlicher Dienstestandards zur Umsetzung einer Geodateninfrastruktur eines sensorbasierten Frühwarnsystems

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

an der Agrar- und Umweltwissenschaftlichen Fakultät

der Universität Rostock

vorgelegt von

M. Sc. Kai Walter

aus Rostock

Rostock, den 27.04.2012

urn:nbn:de:gbv:28-diss2012-0115-5

Tag der mündlichen Prüfung: 23.11.2012

Gutachter: Prof. Dr. Ralf Bill (Universität Rostock)

Prof. Dr. Wolfgang Reinhardt (Universität der Bundeswehr, München)

Prof. Dr. Klaus Greve (Universität Bonn)

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	i
1. Einführung	1
1.1. Problemstellung	1
1.1.1. Naturgefahren	1
1.1.2. Informations- und Kommunikationstechnologie	2
1.2. Zielsetzung	4
1.3. Aufbau der Arbeit	4
2. Stand der Forschung im Bereich Geomonitoring und Geosensornetze	7
2.1. Forschung im Bereich gravitative Massenbewegungen	8
2.2. Forschung im Bereich Vernetzung von Geosensoren	10
2.3. Auswertung der Forschungsansätze	11
2.4. Projekt SLEWS	12
2.4.1. Zielsetzung	12
2.4.2. Sensorik zur Erfassung von Hangrutschungsereignissen	14
2.4.3. Datenerfassung mithilfe von low-cost-Sensorik	16
2.4.4. Sensornetz	17
2.4.5. Datenaufbereitung und -auswertung	19
2.4.6. Informationsverarbeitung und -verteilung	19
2.4.7. Wissenschaftlicher Beitrag des Projekts SLEWS	19
3. Basistechnologien für Geodateninfrastrukturen und Sensor Web	22
3.1. Service Oriented Architecture und Web Services	22
3.2. Standardisierung der räumlichen Datenverarbeitung	24
3.3. Geodateninfrastruktur (GDI)	25
3.4. OGC Sensor Web Enablement	26
3.4.1. OGC SWE-Dienste	28
3.4.2. OGC SWE Formate	32
3.4.3. Aktuelle Entwicklungen der OGC SWE-Initiative	34
3.5. Erste Bewertung der OGC SWE-Technologie	35
4. Konzeption eines sensorbasierten Frühwarnsystems	36
4.1. Nutzeranforderungen: Von Sensormessungen zu Warnungen	36
4.1.1. Identifizierung von Endnutzern	36
4.1.2. Ermittlung der Anforderungen	37
4.1.3. Anforderungsanalyse	38
4.2. Einbeziehung von Multisensor- und Datenfusion	40
4.3. Einordnung in eine Frühwarnkette	42
4.4. Technische Anforderungen: Von Rohdaten zu Informationsprodukten	43

4.4.1. Prozessmodellierung	45
5. Nahtstelle zur Geodateninfrastruktur: Datenbereitstellung.....	48
5.1. Datenerfassung	48
5.1.1. Konfiguration des Sensornetzes	48
5.1.2. Vorprozessierung und Bereitstellung der Messdaten	49
5.2. Formalisierung.....	51
5.2.1. SWE-basierte Modellierung der Messdaten	52
5.3. Eintragung in die Datenhaltung	54
5.3.1. Sensorseitige Formalisierung	55
5.3.2. Diensteseitige Formalisierung.....	56
5.3.3. Umsetzungen diensteseitiger Formalisierung	60
5.4. Datenverwaltung und -bereitstellung.....	65
5.4.1. Implementation des Sensor Observation Service	65
5.4.2. Datenmodellierung im SOS	67
5.4.3. Modellierung und Beschreibung des Sensornetzwerks in SensorML	70
5.5. Semantische Problemstellungen	78
5.5.1. Nutzungs- und Verbesserungsvorschläge	81
6. Nahtstelle zur Frühwarnung: Informationsverarbeitung	83
6.1. Benachrichtigung.....	83
6.1.1. Implementierung des Sensor Alert Service.....	85
6.1.2. Einbindung des Sensor Alert Service	85
6.2. Umsetzung des abgestuften Warnkonzepts der Frühwarnkette.....	89
6.3. Informations- und Visualisierungsprodukte	95
6.4. Informations- und Dienstorchestrierung des Informationssystems.....	100
6.5. Interoperabilitätsnachweis	103
6.6. Möglichkeiten zur ad hoc-Informationssorchestrierung.....	105
7. Fazit.....	110
7.1. Bewertung der Zielstellungen	110
7.2. Abschließende Bewertung der OGC SWE-Technologie	111
7.3. Offene Fragen	113
7.4. Abschließender Ausblick	114
Abbildungsverzeichnis	116
Tabellenverzeichnis	118
Listing-Verzeichnis.....	118
Literaturverzeichnis.....	120
Anhang	132

1. Einführung

1.1. Problemstellung

Extreme Naturereignisse, die zunehmende Nutzung natürlicher Ressourcen und Folgen des globalen Klimawandels stellen die Umweltforschung vor immer größere Herausforderungen. Die Entwicklung moderner Informations- und Kommunikationstechnologie bildet eine unverzichtbare Grundlage, um Umweltprozesse in ihrer gesamten Komplexität ergründen zu können. Die Motivation für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen soll anhand der folgenden Problemstellungen näher erläutert werden.

1.1.1. Naturgefahren

Die Zahl der von extremen Naturereignissen verursachten Schäden ist in den vergangenen Jahren beträchtlich gestiegen. Nach Angaben des weltgrößten Rückversicherers Munich Re (Munich Re, 2012) übertraf das Jahr 2011 mit rund 380 Milliarden US-Dollar gesamtwirtschaftlichem Schaden deutlich den bisherigen Spitzenreiter 2005 mit 220 Milliarden US-Dollar, gefolgt vom Jahr 2008 (200 Mrd. US-Dollar). Gemessen an der Zahl der Opfer stellt 2010 das bisher verheerendste Schadensjahr mit ca. 300.000 Todesfällen dar, gefolgt vom Jahr 2008 mit 220.000 Todesfällen. Ausschlaggebender Faktor ist dabei nicht zwangsläufig die Zunahme der Häufigkeit von Naturkatastrophen, sondern vor allem die natürliche Veränderung des Lebensraums des Menschen. Durch Bevölkerungszuwachs bedingter Siedungsdruck, zunehmende Urbanisierung und verändertes Landnutzungsverhalten führen fortwährend zu einer Ballung von Risikogruppen und Infrastrukturen in gefährdeten Gebieten. Auch weiterhin ist mit einem anhaltenden Trend zur Steigerung von Risiko- und Schadenspotentialen zu rechnen. Die skizzierte Entwicklung gilt analog auch für Hangrutschungsereignisse, deren katastrophale Auswirkungen weltweit durch verstärkte Nutzung von räumlichen Ressourcen zugenommen haben. Allein in den USA fordern Hangrutschungen jährlich mehr als 25 Opfer und verursachen zwischen ein und zwei Milliarden US-Dollar an Schaden (USGS, 2011). Trotz des erkennbaren Fehlens einer öffentlichen Bedrohungswahrnehmung zeigen jüngste Zwischenfälle und Gutachten auch die heimische Gefährdung für Menschenleben und Sachwerte auf. Bei Hangrutschungen in Bozen (Welt Online, 2010), Nachterstedt (Zeit Online, 2009) und Stein an der Traun (Spiegel Online, 2010) kamen 2009 und 2010 mindestens 14 Opfer ums Leben. Für Verkehrswege im Rhein-Moselgebiet wurde nach Schadensereignissen in den Jahren 2001 und 2002 ein Schadenspotential in der Höhe von 100 Millionen Euro geschätzt (Krauter et al., 2004).

Die zentrale Aufgabe für Forschung und Entwicklung liegt deshalb in der Minderung von zukünftigen Schäden (Kümpel et al., 2011), vor allem durch die Prognose von Ereignissen. Dies ist besonders dort wichtig, wo technische Schutzmaßnahmen zu

teuer sind oder sich aus anderen Gründen nicht realisieren lassen. Um das Verständnis von Hangrutschungsprozessen dahingehend zu fördern, Vorhersagen tätigen zu können, ist die Weiterentwicklung von rechnergestützten Modellen erforderlich. Insbesondere da Hangrutschungsereignisse oft am Ende von Kausalitätsketten stehen, liegt eine Kopplung mit anderen Systemen wie z.B. Erdbeben- und Niederschlagsmodellen zwingend nahe. Moderne Geomonitoring- und Geoinformationstechnologien ermöglichen schon länger die Identifizierung von gefährdeten Gebieten, allerdings auf einer zeitlich und räumlich nur sehr großen Skala, ohne dabei wichtige in situ-Begebenheiten kontinuierlich einzubeziehen (Niemeier, 2011). Um jedoch feinmaschigere Kartierungen von bedrohten Regionen anfertigen zu können, ist die breite Datenerfassung von auslösenden und beteiligten Faktoren und Parametern notwendig (siehe hierzu auch Koordinierungsbüro Geotechnologien, 2010, S. 71ff und Senatskommission für Geowissenschaftliche Gemeinschaftsforschung der Deutschen Forschungsgemeinschaft, 2010, S. 91ff, S. 105ff).

1.1.2. Informations- und Kommunikationstechnologie

Durch die rapide technische Entwicklung von Informationstechnologie und Mikroelektronik stehen Datenquellen theoretisch in einer unüberschaubaren Allgegenwärtigkeit von Sensoren und Datenbanken zur Verfügung. Diese reicht von hoch spezialisierten Plattformen über Forschungsnetze bis hin zu Massenware aus Verbraucherelektronik und Automobilindustrie. Trotz dieses vermeintlichen Angebots sind Sensordaten nach dem derzeitigen Stand der Praxis nur wenig effektiv nutzbar, da keine ausreichend entwickelte Infrastruktur für Zugang und Verarbeitung zur Verfügung steht. Zwar haben Internet und World Wide Web die Art und Weise, wie auf Informationen zugegriffen wird, revolutioniert und sind zu unverzichtbaren Werkzeugen zum Austausch von Daten geworden, dennoch ist die Auffindbar-, Austausch- und Nutzbarkeit von räumlichen und insbesondere Sensordaten über das Internet derzeit nicht optimal gelöst. Als Konsequenz daraus resultiert eine mitunter ineffiziente Verwertung von verfügbaren Datenressourcen. An den Auswirkungen der verheerenden Erdbeben- und Tsunamikatastrophe in Japan im Jahr 2011 ist dieser Umstand besonders eindringlich zu sehen. Trotz der allgemeinen Verfügbarkeit einer entwickelten Infrastruktur zur Messung von radioaktiver Strahlung, von beeinflussenden Witterungsverhältnissen und darauf aufbauenden Frühwarnmodellen zur zeitnahen Berechnung einer Ausbreitungsprognose, waren entsprechende Informationen kaum zugänglich und konnten über einen längeren Zeitraum sogar zurückgehalten werden. Das Fehlen dieser Informationen resultierte in nachhaltigen Fehlentscheidungen bei der Evakuierung der Bevölkerung des Großraums Fukushima (Biocatastrophe Blog, 2011).

Auch die Nutzung hangrutschungsspezifischer Daten ist in gefährdeten Gebieten nicht effizient umgesetzt. Aufgrund hoher Anschaffungs- und Unterhaltungskosten können nur ausgewählte Hanggebiete mit leistungsfähigen Spezialsystemen auf Rutschungen überwacht werden. Beobachtungen dieser Systeme könnten jedoch

auch über den spezifischen Anwendungsfall hinaus zum Erkenntnisgewinn beitragen, fristen jedoch aufgrund monolithischen Systemdesigns mit eng formulierten Einsatzkonzepten ein Inseldasein. Daten sind nur eingeschränkt zugreif- und austauschbar und können nur bedingt interoperabel in den Kontext anderer Informationsquellen gesetzt werden. Trotz der möglichen Senkung der Anwendungs- und Aussagegenauigkeit einer solchen Quervernetzung kann im schlechtesten Fall der Ansatz „Daten als Massenware“ (Arctur, 2011) zu einer nützlichen Vervollständigung des lückenhaften Beobachtungsbilds der Erdoberfläche führen. Ein hoher Spezialisierungsgrad von Beobachtungsdaten und ihrer Analyse in Blackbox-artigen Systemen kann weiterhin dazu führen, dass Ergebnisse oft nicht unmittelbar verwertbar sind und entlang der Verarbeitungskette zur Frühwarnung Medienbrüche, Verzögerungen und Informationsengpässe auftreten können. Wünschenswert sind jedoch eine direkte Integrierbarkeit der Messungen vom Erfassungszeitpunkt an und die Erzeugung von Mehrwerten durch die Kopplung mit externen Datenquellen.

Argumentativ stützt sich diese Arbeit deshalb auf die weithin verbreitete wissenschaftliche Ansicht, dass die umfassende Vernetzung von Sensorsystemen und anderen heterogenen distributiven Datenressourcen die Zukunft eines verbesserten Verständnisses von Umweltprozessen und Naturgefahren darstellt (Vector 1 Magazine, 2011). Wissenschaft und Wirtschaft streben so die Schaffung eines zentralen Nervensystems der Erdoberfläche zur Überbrückung der Lücke zwischen Umwelt und Informationstechnologie an (The New York Times, 2010). Eine wichtige Basis stellt die noch weiter auszubauende Nutzung des Internets und World Wide Web als zentrales Grundgerüst dar. Anders als bisher bedarf es jedoch einer konsequenteren Umsetzung und Nutzung von offenen herstellernerneutralen Standards, die die Organisation und Dokumentation von Umweltdaten regelt. Wichtig ist dabei vor allem die Herausstellung des semantischen Kontexts, in dem diese stehen. Größte Schwäche der derzeitigen Organisationsform des World Wide Web liegt in der Indizierung und Recherche von Informationen nach ihrer Schreibweise (Syntax) und nicht nach ihrer Bedeutung (Semantik). Daten sind aufgrund fehlender formaler Beschreibung nur schwer oder gar nicht auffindbar und entsprechen in ihrer Organisation einer Bibliothek ohne Referenz- und Schlagwortkataloge. Die Zukunft der Umweltforschung liegt in der Verwendung von Informationen, deren Bedeutung und Zusammenhang (Was? Wann? Wo? ...) über das Internet erschließbar ist, ohne sich mit system- und organisationsabhängigem Detailwissen auseinandersetzen zu müssen.

Die moderne Geoinformatik bietet mit Mitteln der Standardisierung von Datenformaten und Formulierung von interoperablen Schnittstellen zwischen räumlichen Informationsressourcen wie z.B. Geosensornetzwerken (GSN), der Spezialform eines Sensornetzes durch Verknüpfung mit einem räumlichen Kontext, die essentiellen Werkzeuge für diese Herausforderung. Die Verwendung des Ortsbezuges ist dabei ein wesentlicher Parameter für die Herstellung eines nachhaltigen semantischen Rahmens für Umweltdaten („*Everything is somewhere*“ OGC, 2011a, S. 10ff). Durch den formalisierten Zugriff auf selbstbeschreibende, von Mensch und Maschinen lesbare Informationen wird eine automatisierte Interpretation und Integration von verteil-

ten Datenquellen möglich. Die so entstehende Vernetzung raumbezogener Datenquellen aller Art in ein Geo Web stellt einen wesentlichen Beitrag zum Aufbau eines semantisch organisierten Internets (Semantic Web) dar.

1.2. Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist die Herausarbeitung des Potentials und möglicher Vorteile der Verwendung von Geosensornetzwerken in Verbindung mit räumlicher (Sensor Web) Dienstetechnologie moderner Geodateninfrastrukturen (GDI) zur Verbesserung der Datenverarbeitung im Bereich der Umweltforschung, konkretisiert am Beispiel von Naturgefahren durch Hangrutschungen. Folgende offene Forschungsfragen und -aufgaben sollen dabei behandelt werden (vgl. Koordinierungsbüro Geotechnologien, 2010, S. 84ff)

1. Aufbau und Skalierung von Informationssystemen durch Integration verschiedenster räumlicher dienstebasierter (Sensor-)Datenquellen zur optimalen Bereitstellung von Informationen zur Bewertung umweltbezogener Prozesse
2. Automatisierte Auffindung adäquater Diensteressourcen und ihre ad hoc Integration durch die semantische Interpretation mensch- und maschinenbasierter Anfragen und Umsetzung in entsprechende Prozessketten
3. Kopplung von Datenressourcen mit dezentralen Prozessierungsressourcen zur Erstellung von Auswertungs-, Modellierungs- und Simulationsmodellen sowie zur ereignisbasierten Benachrichtigung

Hierbei steht die Integration spezieller massentauglicher Präzisionssensorik in Form intelligenter Sensornetzwerke unter gezielter Berücksichtigung des Einsatzes im Frühwarn- und Risikomanagement im Fokus. Alle Teilsysteme einer Frühwarnkette, beginnend bei der Sensormessung bis hin zur Bereitstellung von Informationsprodukten für die Alarmierung, sollen lückenlos durch Nutzung modularer Dienste umgesetzt und zu einer flexiblen Gesamtarchitektur orchestriert werden. Die verhältnismäßig neuartige Verbindung dieser Technologie mit dem Feld des frühwarnbezogenen Geomonitorings soll auf ihre Umsetzbarkeit und Implementationsaufwand überprüft werden und damit einen Informationszugewinn für Sensor- und Frühwarnsystembetreiber wie auch für Sensorhersteller liefern. Ergebnisse und Rückschlüsse dieser Arbeit setzen sich dabei vor allem mit Zusammenhängen und Anforderungen auseinander, die aus dem konkreten Anwendungsszenario des Projekts SLEWS (Sensor based Landslide Early Warning System) entstanden sind und erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit bei der Übertragbarkeit auf weitere Anwendungsfälle.

1.3. Aufbau der Arbeit

Der Aufbau dieser Arbeit gliedert sich in sechs Kapitel. Die Abfolge der zentralen Kapitel ist in Abbildung 1 veranschaulicht.

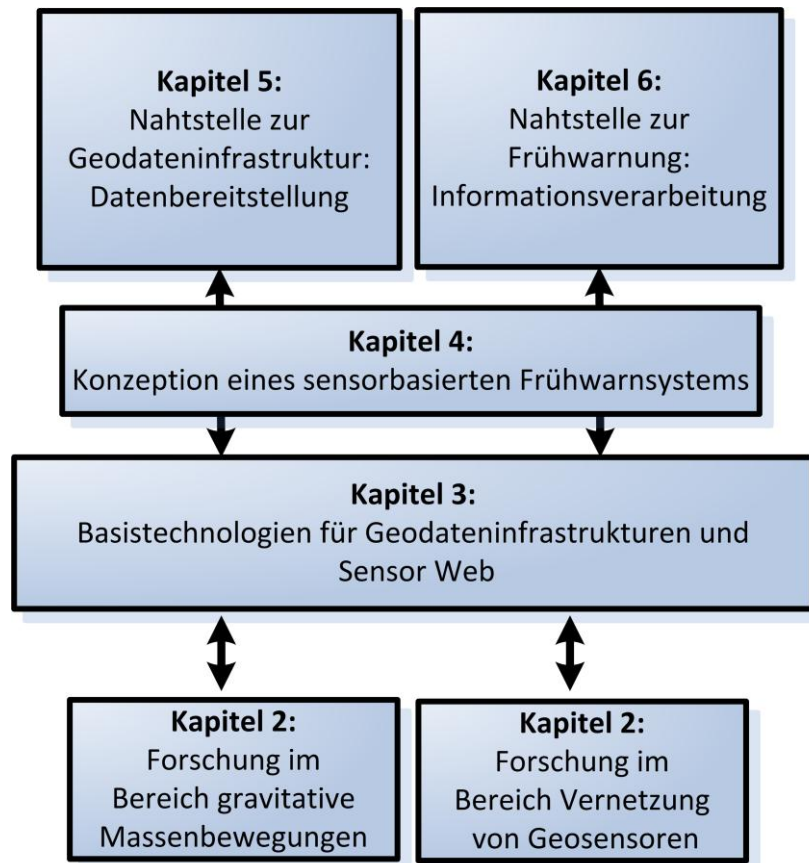


Abbildung 1: Kapitelaufbau

Kapitel 2 behandelt den Stand der Forschung im Bereich des Geo- und Umweltmonitoring mithilfe von Geosensornetzwerken unter Anwendung bei gravitativen Massenbewegungen sowie im Bereich der standardisierten Vernetzung von Sensordaten mithilfe von Geoinformationstechnologie. Hierbei werden Bestrebungen und Ziele des Forschungsprojekts SLEWS näher vorgestellt, in dem moderne räumliche Datenverarbeitung als Basis für ein sensorbasiertes Informations- und Frühwarnsystem zum Einsatz kommen soll und in dessen Rahmen die vorliegende Arbeit entstanden ist. Kapitel 3 setzt sich daran anknüpfend mit dem aktuellen Entwicklungsstand dieser Technologie auseinander, die auf den vorgestellten Forschungsbereich zunehmenden Einfluss hat.

Kapitel 4 umfasst die Konzeption der Architektur eines Informations- und Frühwarnsystems anhand von unterschiedlichen Anforderungen, die im Rahmen der Forschungsarbeiten des Projekts SLEWS identifiziert werden konnten. Kernpunkte sind dabei die Integration von Sensor- und Datenfusion sowie die Verknüpfung von technischer Infrastruktur mit Nutzer- und Anwendungsebene.

Kapitel 5 beschreibt, wie Messdaten des verwendeten Sensorsystems standardisiert aufbereitet und in die Datenhaltung der aufzubauenden Geodateninfrastruktur zur interoperablen Bereitstellung überführt werden können.

Kapitel 6 zeigt, wie mithilfe der Dienste- und Datenhaltung der Geodateninfrastruktur die Grundlage für darauf aufbauende Funktionen des Informationssystems für Datenzugriff, Analyse, Präsentation und Benachrichtigung geschaffen werden kann. Ziel soll es hierbei sein, durch entsprechende Informationsvermittlung und Bildung unterschiedlicher Kommunikationsprofile eine Frühwarnkette aufzubauen.

Kapitel 7 beschließt die Arbeit mit der Auseinandersetzung der erzielten Ergebnisse bezüglich gestellter Anforderungen und bestehender Forschungsfragen und diskutiert Aspekte sowie offene Punkte in Aussicht auf zukünftige Entwicklungen.

2. Stand der Forschung im Bereich Geomonitoring und Geosensornetze

Geosensornetzwerke spielen im Geo- und Umweltmonitoring eine immer wichtigere Rolle. Der steigende Grad der Miniaturisierung von Sensorik, Prozessoren und Funkmodulen ermöglicht die Einführung einer neuen Klasse von Sensornetzwerken, mit denen eine preisgünstige, kabellose und großflächige Datenerfassung realisiert werden kann. Bei der Abschwächung von Schadensauswirkungen gravitativer Massenbewegungen stellen auf Geosensornetzen basierte Monitoring- und Frühwarnsysteme, neben der Entsiedelung von Gefahrengebieten, Abtragung bzw. Absicherung von Gefahrenkörpern oder Installation von Schutzbauten, ein adäquates Mittel in einem akzeptablen Verhältnis zum Installationsaufwand und den Kosten dar. Mit Hilfe geodätischer und geophysikalischer Messungen werden Hanggebiete zum Teil durch die Kombinationen verschiedener Beobachtungsphänomene (Sensorfusion) überwacht, rechnergestützt prozessiert und mit Hilfe räumlicher Informationssysteme analysiert und visualisiert. Frühwarnbasierte Informationssysteme erfordern komplexe Informations- und Kommunikationsstrukturen um eine Kopplung dieser unterschiedlichen Felder bewerkstelligen zu können. Moderne webbasierte Geodateninfrastrukturen (GDI) bieten sich für die Umsetzung dieser Aufgaben an. Die Einbettung von Geosensornetzwerken in Geodateninfrastrukturen steht momentan noch am Beginn der Entwicklung, verspricht jedoch klassische monolithische Systeme in Zukunft ersetzen zu können.

Seit einigen Jahren wirken sich dabei vor allem Arbeiten der Sensor Web Enablement-Initiative (SWE) des Open Geospatial Consortium (OGC) auf Bestrebungen aus, Sensoren über das Internet vernetzt auffindbar, abfragbar und ggf. auch steuerbar zu machen, um das Informationsangebot von Geodateninfrastrukturen erweitern zu können. Die Entwicklung und Adaption offener Standards an den Schnittstellen zwischen Sensorsystemen, Geodateninfrastrukturen und Endnutzern soll einen interoperablen Austausch und die Integration in bestehende Infrastrukturen zukünftig erleichtern. Weltweit werden Systeme zur Identifizierung von Naturgefahren (z.B. Hochwasser, Stürme, Tsunamis) aufgebaut oder sind bereits in Betrieb. Durch die maßgebliche Orientierung am technisch Machbaren steht eine Vernetzbarkeit jedoch oft zu wenig im Vordergrund. In Deutschland sind die Strukturen zur Gefahrenabwehr und die Endnutzerstrukturen hinsichtlich Massenbewegungsgefahren, auf die Systeme aufsetzen können, zudem nicht ausreichend transparent.

Im Folgenden sollen zur Schaffung eines breiten Überblicks beispielhaft verschiedene Projekte aus dem Bereich der frühwarnbasierten Überwachung von gravitativen Massenbewegungen unter Verwendung von Geosensornetzwerken sowie aus dem Bereich der großskaligen Vernetzung von Sensoren zu einem Sensor Web zur Integration in moderne Geodateninfrastrukturen beschrieben werden.

2.1. Forschung im Bereich gravitative Massenbewegungen

Moderne lokale und regionale Geomonitoring- und Frühwarnsysteme zur Überwachung gravitativer Massenbewegungen kommen seit den 1980er Jahren zum Einsatz. Erste Vertreter wurden 1984 in Utah, USA (beschrieben in Baum, 2007) und 1986 in San Francisco, USA (Keefer et al., 1986) zur Erfassung von Murengängen durch hydrophysikalische Auslöser (Niederschlag, Schneeschmelze) installiert. Gemeinsamkeiten dieser und folgender Systeme zur Erfassung von Muren (siehe Bell et al., 2010) lagen vor allem in der Analyse entsprechender hydrologischer Parameter und der Festlegung kritischer Schwellenwerte. Die Automatisierung und Vernetzung von Messstationen führte seitdem zu einer kontinuierlichen Weiterentwicklung von Systemen. Erfolgreiche Vertreter kommen beispielsweise in Rio de Janeiro, Brasilien (Ortagio et al., 2001) und Hong Kong, China (Schuster & Highland, 2007) zum Einsatz. Aktuelle Systeme setzen vermehrt darauf, verschiedene Sensorarten zur Erfassung verschiedener Phänomenkombinationen (Sensorfusion) und moderne Netzwerktechnologien zu vereinen. Unter anderem kommen dabei globale und lokale Positionierungssysteme sowie verschiedenste Sensoren (Geophone, Inklinometer, Druckmesser, Dehnungsmesser, Reflektometer etc.) zum Einsatz.

(Terzis et al., 2006) beschreiben die Nutzung eines drahtlosen Sensornetzwerkes zur Ermittlung der Lage der Verschiebungsfläche bei einer Hangrutschung. Dazu werden Sensorsäulen eingesetzt, die mit Geophonen, Druckmessern, Porendruckmessern und Reflektometern ausgestattet sind. Diese werden verteilt über dem Hanggebiet in den Boden eingelassen und können drahtlos Informationen ins Netzwerk übertragen.

(Sheth et.al., 2005) beschreiben ein dezentrales Sensorsystem zur Vorhersage von Hangrutschungen nach starken Regenfällen und Schneeschmelzen (Projekt SENSLIDE). Hier wird eine große Anzahl von kostengünstigen Dehnungsmessstreifen über das Hanggebiet verteilt installiert und über drahtlos verteilte Knotenpunkte verbunden.

(Ramesh, 2009) beschreibt die Nutzung von drahtlosen Sensornetzwerken unter Berücksichtigung biologisch inspirierter Informationsverarbeitung (Projekt WINSOC), um Hangrutschungen und Schlammströme zu erkennen. Hierbei kommen Sensorsäulen mit verschiedenen Sensoren wie Geophonen, Dehnungsmessstreifen, Feuchtigkeits-, Porendruck- sowie Neigungssensoren zum Einsatz.

Ein Beispiel für ein geodätisches Überwachungssystem für deformationsgefährdete Objekte ist am System „GOCA“ (Jäger, 2008) zu zeigen. GOCA wurde zur Echtzeitüberwachung von Bewegungen der Erdoberfläche entwickelt und findet Anwendung als Überwachungssystem u.a. bei Hangrutschungen, Vulkanen oder bei sicherheitsempfindlichen Bauwerken und geotechnischen Anlagen aller Art wie z.B. Dämmen oder Staumauern. Aufbauend auf dem Einsatz von Globalen Navigationssatellitensystemen (GNSS) wie dem amerikanischen GPS (Global Positioning System), Lokalen Positionierungssystemen (LPS) und lokalen Sensoren (z.B. Inklinometern) wer-

den Daten in proprietären Formaten über drahtgebundene Netze oder Mobilfunk zu einer Zentrale gesendet und dort verarbeitet.

Weitere Projekte mit analogen Ansätzen existieren u.a. in Norwegen (Blirka, 2008) und Südtirol (Egger & Mair, 2009), sowie weltweit in unterschiedlichsten Varianten und Einsatzformen, die nicht in einem kompletten Umfang aufgeführt werden können.

Viele „klassische“ Vertreter genannter Überwachungssysteme weisen meist eine monolithische Systemarchitektur auf, sind zwar technisch spezialisiert und sehr leistungsfähig, jedoch gleichermaßen komplex und wenig flexibel. Sie ziehen dadurch hohe Beträge an Betriebs- und Personalkosten nach sich. Einbettung finden diese Systeme in einer komplexen und eng gegliederten Abfolge von Protokollen, deren genaue Einhaltung von kritischer Bedeutung für mögliche Frühwarn- und Rettungsszenarien ist. In vielen der genannten Beispiele finden Auswertungen oft von einer Abfolge von Experten und lokalen Entscheidungsträgern statt, die die Aussprache von Warnungen z.B. durch Warnschilder, lokale Durchsagen/Sirenen oder Radio/TV nach sich ziehen. Das Versagen einzelner Elemente dieser Kette kann so unter Umständen zu massiven Störungen in der korrekten Verbreitung von benötigten Informationen und damit zu Fehlplanungen im Katastrophenmanagement führen. Neben der Weiterentwicklung der technischen Komponenten von Systemen ist somit auch die Einbettung in ein Gesamtinformationsverarbeitungskonzept zur Erstellung von Frühwarnketten zu beachten (siehe Kapitel 4). Jüngste Forschungsbestrebungen setzen sich neben der technischen Weiterentwicklung verstärkt mit Konzepten der Informationsvermittlung auseinander. Hierbei sind z.B. Projekte zu nennen, die ebenso wie das Projekt SLEWS im Rahmen des Programms „Geotechnologien“ gefördert wurden.

Das Projekt „alpEWAS“ (Thuro et al., 2009) entwickelt ein sensorbasiertes Monitoring- und Frühwarnsystem mit Hilfe von Time-Domain Reflectometer-Kabeln (TDR), automatischer Tachymetrie und einem low-cost Satellitenverortungssystem. Die Kommunikation zwischen Sensoren und einer Zentralstation erfolgt drahtlos. Auf der konzipierten und webbasiert zugänglichen Informationsplattform können unterschiedliche Schwellenwerte angepasst werden, bei deren Überschreitung Benachrichtigungen (z.B. SMS und E-Mail) an nachstehende Benutzergruppen versendet werden.

Das Projekt „ILEWS“ (Bell et al., 2010) baut sowohl auf drahtlosen wie auch drahtgebundenen Sensornetzen auf, welche Bewegungen an der Oberfläche und im Untergrund sowie verschiedene Klimaparameter und vor allem die Bodenfeuchte mittels verschiedener Ansätze (TDR, Extensiometer etc.) erfassen können. Das darauf aufbauende Frühwarnsystem bezieht dabei sowohl historische Beobachtungsdaten wie auch physikalische Stabilitätsmodelle ein. Informationen und Daten sind über eine moderne Geodateninfrastruktur zugänglich.

Das Projekt „EGIFF“ (Breunig et al., 2009) untersucht mithilfe eines Finite-Elemente-Modells den Aufbau einer modernen webbasierten Plattform zur Entscheidungsunterstützung. Weitere Arbeiten beschäftigten sich mit der automatisierten Auswertung von Medienmitteilungen zur Verortung gravitativer Massenbewegungen. Der Schwerpunkt des Projekts liegt auf der Entwicklung neuartiger Methoden zur effektiven Informationsvisualisierung, die innerhalb von Frühwarnsystemen eingesetzt werden können.

Zukünftige Bestrebungen beim Aufbau technischer Komponenten von Frühwarnsystemen versprechen eine konsequente Weiterentwicklung der genannten Ansätze, sowohl auf Seiten der Hardwareleistung (Miniaturisierung, Energieeffizienz), Sensorfusion (Sensor Hubs) wie auch auf Seiten der Zugänglichkeit (ad hoc-Webintegration). Entsprechende Pilotprojekte werden z.B. von Intel (Laptopmag, 2011) und Hewlett Packard (The New York Times, 2010) umgesetzt.

2.2. Forschung im Bereich Vernetzung von Geosensoren

Wie beschrieben stellt die Entwicklung von Informationskomponenten und darauf aufbauenden Frühwarnketten einen wichtigen Bestandteil aktueller Frühwarnsysteme dar. Geoinformationssysteme (GIS) finden dabei bereits seit vielen Jahren in der Verbindung mit Geosensornetzwerken und Frühwarnsystemen Anwendung. Moderne Geodateninfrastrukturen bilden hierfür eine wichtige Basis. Die Sensor Web Enablement-Initiative des Open Geospatial Consortium (OGC SWE) beschäftigt sich seit über 10 Jahren mit der Zusammenfassung von verteilten Sensorsystemen und Sensornetzen unterschiedlichster Art über das Internet als interoperable Anwendungsschicht (Sensor Web) zur Integration in Geodateninfrastrukturen. Neben dem Einsatz in Pilotprojekten und Feldtests des OGC (OGC Webservices Testbed) finden die entwickelten Standards der Initiative in Projekten verschiedenster Bereiche des Umwelt- und Geomonitorings Anwendung.

Hierzu zählen im Bereich Naturgefahren u.a. das Deutsch-Indonesische Tsunami-Frühwarnsystem (GITEWS, Raape et al., 2009), das Projekt SANY (Bleier et al., 2009) im Bereich des allgemeinen Managements von Umweltgefahren und das Projekt OSIRIS (Tacyniak et al., 2008) im Bereich der Waldbranddetektion. In der Meeresforschung ist u.a. das Projekt OOSThetys (Bermudez et al., 2006) und bei der Überwachung von Gewässerständen das Projekt FLUGGS (Heier et al., 2009) zu nennen. Zusätzlich zu den in Kapitel 2.1 genannten Projekten widmet sich das Projekt Debris Flow Monitoring System (Chung et al., 2009) der Überwachung von gravitativen Massenbewegungen. Die Bestrebungen und aktuellen Entwicklungen der zugrunde liegenden Technologie sollen in Kapitel 3 ausführlicher diskutiert werden.

2.3. Auswertung der Forschungsansätze

Die methodischen Ansätze der zuvor beschriebenen Projekte sind sehr breit gefächert und sollen im Folgenden selektiv gegenübergestellt werden. Dabei wurden von den präsentierten Projekten diejenigen ausgewählt, die vergleichbare Ziele wie das Projekt SLEWS verfolgen, das in Kapitel 2.4 eingehend vorgestellt werden soll. Hierzu zählen der Einsatz drahtloser Technologie und die Verwendung von Geosensoren zur Beobachtung gravitativer Massenbewegungen. Tabelle 1 betrachtet die Projekte unter verschiedenen Kriterien der Forschungsansätze:

Tabelle 1: Kriterien der Forschungsansätze von Projekten im Bereich gravitative Massenbewegungen. (✓ = umgesetzt, ○ = bedingt umgesetzt, -- = nicht umgesetzt)

Projekt	Präzis.-sensorik	low-cost	Flexibilität	Sensor-Fusion	Analyse-integration	anwender-orientiert	Vernetzbarkeit	standardisiert
Terzis et al.	○	--	○	✓	✓	--	--	--
SENSLIDE	✓	✓	✓	--	✓	--	--	--
WINSOC	○	○	○	✓	✓	--	○	--
GOCA	✓	--	○	✓	✓	--	○	--
alpEWAS	✓	○	○	✓	✓	○	○	○
ILEWS	✓	○	○	✓	✓	✓	✓	✓
Chung et al.	✓	--	--	✓	✓	✓	✓	✓
SLEWS	✓	✓	✓	✓	--	✓	✓	✓

- „Präzisionssensorik“ (Spalte 2) umfasst die hochgenaue Erfassung direkter Auswirkungen gravitativer Massenbewegungen. Hierzu werden im Gegensatz zu auslösenden und begleitenden Faktoren (gemessen z.B. über Porenwasserdruck, Geophone) maßgeblich direkte Bewegungsbeobachtungen wie z.B. Neigung, Verschiebung oder Spaltenaufweitungen der Hangoberfläche gezählt.
- „low-cost“ (Spalte 3) beschreibt den Einsatz kostengünstiger Messtechnik. Der Begriff kostengünstig soll dabei nicht im relativen Verhältnis zu hochqualitativen Alternativprodukten, sondern im Rahmen massentauglicher Verbraucherware gesehen werden.
- „Flexibilität“ (Spalte 4) umfasst die generelle Simplizität im Umgang mit Sensoren bzw. dem Sensorsystem, wobei nicht nur die (drahtlose) Kommunikation im laufenden Betrieb sondern auch die Ausbringung und Mobilität im Feld berücksichtigt werden soll.

- „Sensorfusion“ (Spalte 5) beschreibt die Erfassung verschiedener Beobachtungsphänomene unterschiedlicher Sensorarten zur Verifizierung bzw. Falsifizierung von Messungen.
- „Analyseintegration“ (Spalte 6) berücksichtigt die Integrierung von automatisierten Analyse- und Bewertungsprozessen.
- „anwenderorientiert“ (Spalte 7) umfasst die Möglichkeit der Ausrichtung und Anpassung an anwenderspezifische Anforderungen und Kommunikationsprozesse der Informationsdissemination, die über die grundlegende Benachrichtigung von Fachanwendern bei Schwellwertüberschreitungen hinausgeht.
- „Vernetzbarkeit“ (Spalte 8) umfasst die Nutzung des Systems über den eigenen Anwendungskontext hinaus. Hierzu zählt mindestens die (internetbasierte) Zugänglichkeit für externe Nutzer und Anwendungen sowie die Integrierung externer Quellen und Ressourcen.
- „standardisiert“ (Spalte 9) beinhaltet die Umsetzung einschlägiger Standards zur Gewährleistung eines interoperablen Daten- und Informationsaustauschs.

2.4. Projekt SLEWS

2.4.1. Zielsetzung

Das Ziel der Forschung im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) in den Jahren 2007 bis 2010 geförderten Verbundprojektes ‚SLEWS - Entwicklung einer Geodateninfrastruktur als Grundlage von Frühwarnsystemen für Massenbewegungen durch die Integration von Echtzeitsensorik‘ umfasst Erforschung, Konzeption und Aufbau eines prototypischen Alarm- und Frühwarnsystems zur Echtzeitüberwachung von Hangrutschungsereignissen mit Hilfe von drahtlosen Sensornetzwerken.

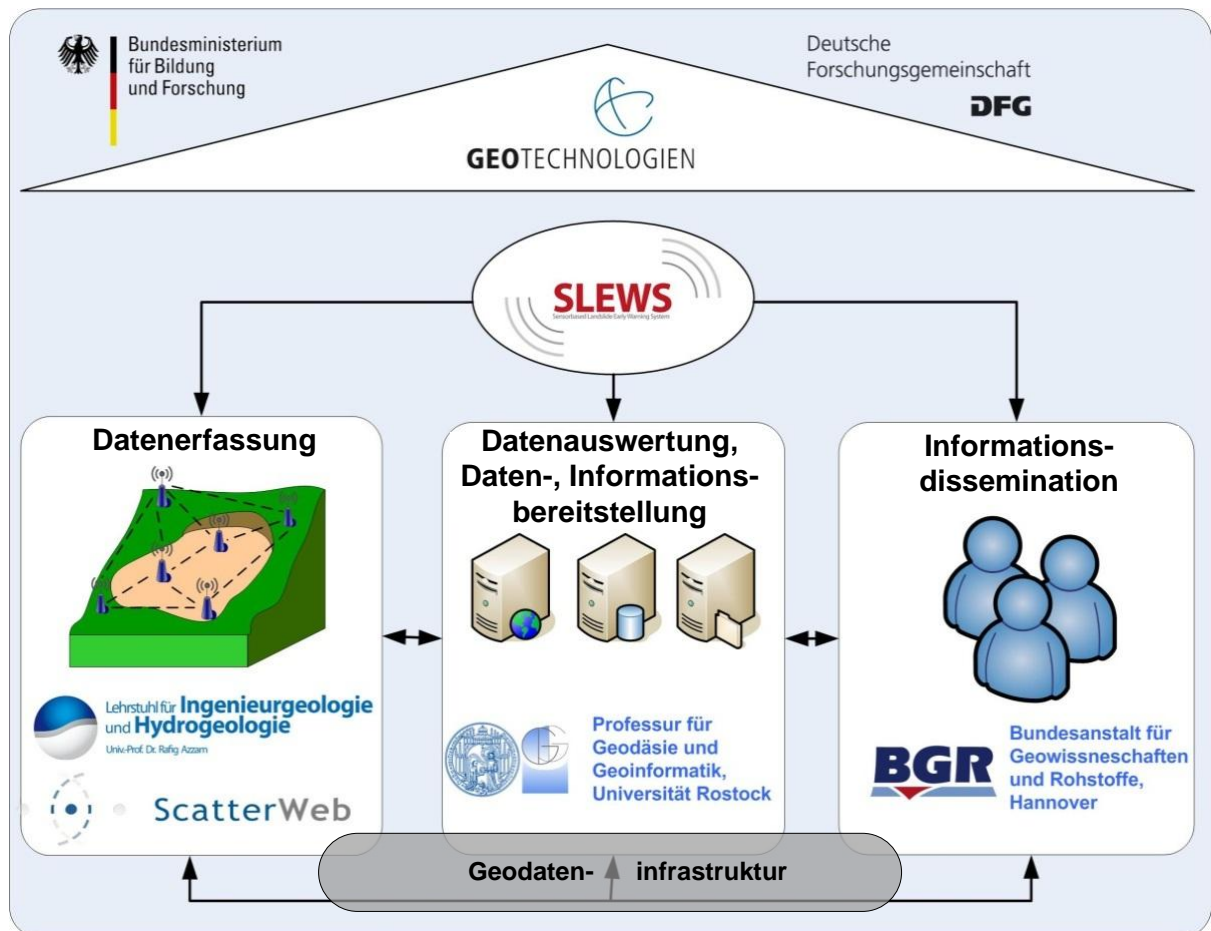


Abbildung 2: Projektstruktur mit den zentralen Projektbereichen und den verantwortlichen Projektpartnern (SLEWS, 2011)

Beteiligte Einrichtungen sind der Lehrstuhl für Ingenieurgeologie und Hydrogeologie der RWTH Aachen (LIH), die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe Hannover (BGR), die ScatterWeb GmbH Berlin (SWB) und die Professur für Geodäsie und Geoinformatik der Universität Rostock (GGR). Die Projektstruktur sowie die Verantwortungsbereiche der Projektpartner im Hinblick auf die Arbeitspakete des Projekts sind in Abbildung 2 schematisch dargestellt und beinhalten folgende Hauptaspekte:

1. „Von realen Bedingungen zu Messwerten“

- Datenerfassung mittels moderner Sensortechnologie und Echtzeitübertragung durch drahtlose Sensornetze
- Auswahl geeigneter Sensortechnologie und Integration in ein modernes drahtloses Sensornetzwerk, Multi-Sensor- und Datenfusion zur Verbesserung der Datenqualität und Minimierung von Fehlmeldungen

2. „Von Daten zu Informationen“

- Auswertung, Analyse und Bereitstellung von Informationen
- Web Services als Interface für die Bereitstellung von Daten sowie der Verarbeitung und Dissemination von Informationen




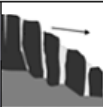
3. „Von Informationen zu Entscheidungen“

- Verarbeitung von Informationen und Informationsbereitstellung in Form verschiedener Kommunikationsprofile für Nutzer

2.4.2. Sensorik zur Erfassung von Hangrutschungsereignissen

Da das Spektrum von Hangrutschungstypen sehr groß ist und nicht alle Sensoren für jeden Hangrutschungstyp geeignet sind, fand im Vorfeld eine Eingrenzung von häufig vorkommenden Massenbewegungstypen statt. (Varnes, 1978) klassifiziert gravitative Massenbewegungen in die Kategorien Fließen, Fallen, Kippen, Gleiten, Driften und Kriechen. Da die Bewegungsraten für Fließbewegungen (z.B. Schlammströme) sehr hoch sind (Meter/Sekunde) und dadurch nur sehr kurze Vorwarnzeiten bestehen, bleibt diese Bewegungsart unberücksichtigt. Im Gegensatz dazu findet beim Kriechen eine sehr langsame Massenbewegung statt (Millimeter/Jahr). Die Vorwarnzeiten sind extrem groß und ein Gefährdungspotential oft nicht akut vorhanden. Im Projekt SLEWS wird somit der Schwerpunkt auf die Bewegungsarten Felskippen, Felsgleiten, Felssturz bzw. Translations- und Rotationsbewegungen im Lockergestein und Driften gelegt, deren Geschwindigkeit im Bereich Meter/Jahr bis Meter/Minute liegen. In Tabelle 2 wird der Einsatz verschiedener Sensorarten hinsichtlich der zu beobachtenden Bewegungsarten bewertet. So lassen sich Beschleunigungssensoren für die Bewegungstypen Fallen, Kippen und Gleiten gut verwenden, da hier Bewegungen mit hohen Beschleunigungskräften auftreten. Das Driften hingegen ist ein relativ langzeitlicher Prozess ohne hohe Beschleunigungsraten. Dem gegenüber sind Neigungssensoren beim Fallen und Driften nur bedingt geeignet, da hierbei kaum Kippbewegungen stattfinden, die noch zeitgerecht eine Frühwarnung auslösen könnten. Wegaufnehmer sind für alle vier Arten geeignet, da bei jeder Bewegungsart Risse und Spalten entstehen, die mit dieser Sensorart gut überwacht werden können. Akustische Sensoren sollen mögliche Geräusche bei Massenbewegungen detektieren. Luftdrucksensoren können eine Höhenänderung bei vertikalen Massenbewegungen erkennen. Temperatur- und Feuchtigkeit- sowie Porenwasserdrucksensoren überwachen in erster Linie auslösende Faktoren wie Feuchtigkeitsgehalt, Niederschlag etc., nicht jedoch die Bewegung selbst. Diese Sensoren werden in der Regel ergänzend verwendet und liefern erst in Kombination mit anderen Sensordaten Informationen zu Bewegungsabläufen. Niederschlagsmessungen können für eine Gefahreneinstufung bei starken Regenfällen vor allem in Gebieten mit Gleit- und Driftbewegungen genutzt werden. Zur Gruppe der geophysikalischen Sensoren gehören u.a. Geophon-Ketten und Seismometer, die sehr gut für Gleitprozesse geeignet sind. Einbindung und Auswertung stellen sich aber als schwierig dar und liefern nur Intensitätswerte von Schwingungen, jedoch keine genauen Werte von z.B. Verschiebungen.

Tabelle 2: Eignung von Sensorarten hinsichtlich zu beobachtender Bewegungsarten von Hangrutschungen (GPS = Global Positioning System, UWB = Ultra Wide Band)

Sensoren	 Fallen	 Kippen	 Gleiten	 Driften
Beschleunigungs-sensor	++	+ / ++	+ / ++	O / +
Neigungssensor	O	++	+	O
Wegaufnehmer	++	++	+ / ++	++
Akustiksensoren	+	+	+	O / +
Höhenmesssensor	++	+	+	O
Temperatursensor	O	O	+	O / +
Feuchtigkeitssensor	O	O	+	+
Porenwasserdruck-geber	O	O	+	+
Geophysikalische Messsensoren	O / +	O / +	+	O / +
GPS	+	+	++	++
UWB	O	+	++	++

++ sehr gut geeignet + / ++ gut bis sehr gut geeignet + gut geeignet O bedingt geeignet O / + bedingt bis gut geeignet

Sensormessungen sind in der Regel nur aussagekräftig, wenn ihre räumliche Position bekannt ist. Um Deformationsvektoren mit globalem Bezug zu erhalten, werden in akut gefährdeten Gebieten geodätische Netze angelegt. Diese Netze sind in der Regel mit einem hohen Aufwand an Personal, Installations- und Betriebsarbeiten verbunden und somit teuer. Es stehen zahlreiche Positionierungssysteme und -methoden zu Verfügung. Als Beispiele sind das Global Positioning System (GPS, Bauer, 2003), die photogrammetrische Vermessung, die Radarvermessung (Luhmann, 2003) und geodätische terrestrische Netzmessverfahren mittels Winkel und Strecken (Kahmen, 2006) zu nennen. Bei Hangausschlägen von einigen Hundert Metern haben sich solche geodätischen Messverfahren etabliert. Da jedoch direkte Sichtverbindungen zwischen Knotenpunkten drahtloser Sensornetzwerke nicht immer gegeben sind, erscheinen Entwicklungen neuartiger Positionierungsmethoden vielversprechend. In Funknetzen wie z.B. im GSM-Mobilfunknetz (Funkzellenortung) oder in drahtlosen Rechnernetzen mit WLAN (Trilateration über Empfangsstärke) oder BLUETOOTH (Bill et al., 2004) sind heute schon Positionsbestimmungen möglich, jedoch ist die ermittelte Positionsgenauigkeit nur bis in den Meterbereich realisierbar und für die Anwendung in einem Frühwarnsystem noch ungeeignet. Ein vielversprechender und auch genauerer Ansatz ist mit Ultra-Wideband (UWB) gegeben. Diese Methode verspricht eine Entfernungsmessung per Funk über Impulsverfahren bis 10GHz mit höherer Genauigkeit (Blankenbach, 2007).

2.4.3. Datenerfassung mithilfe von low-cost-Sensorik

Aufgrund von Untersuchungen im Projekt SLEWS konnten mehrere Sensortypen aus dem low-cost Massenmarktbereich als geeignet für die anvisierten Hangrutschungsereignisse identifiziert werden. Dazu gehören Wegaufnehmer bzw. Seilzugaufnehmer sowie Neigungs-, Beschleunigungs- und Drucksensoren.

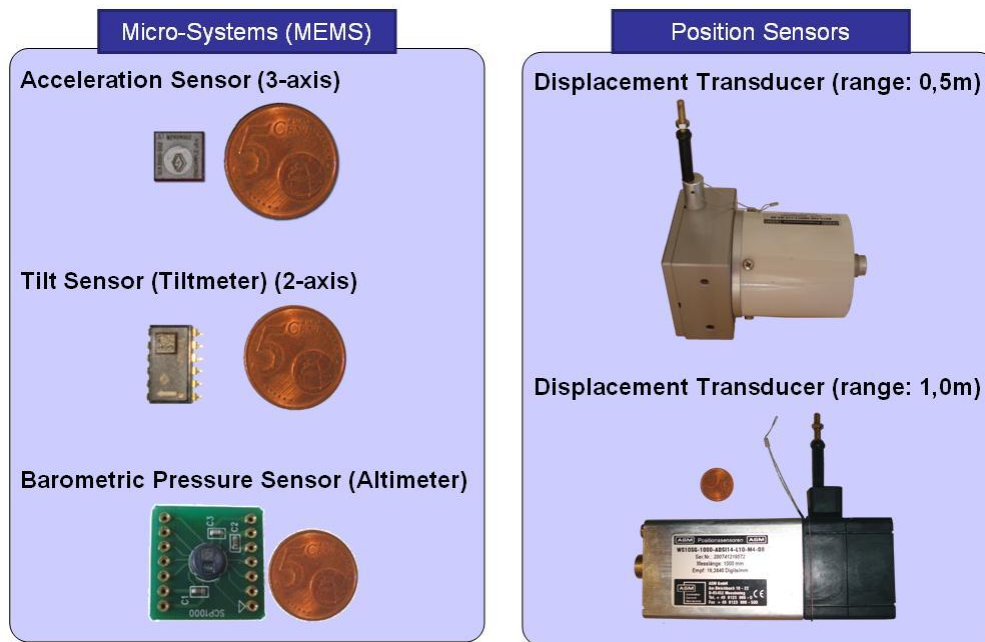


Abbildung 3: Übersicht verwendeter Sensorgruppen mit Sensoren (SLEWS, 2011)

Mit Ausnahme der Seilzugaufnehmer (Displacement Transducer) handelt es sich um Microelectromechanical Systems (MEMS) bzw. Mikrosensoren in Millimetergröße, die bereits im Industriebereich wie z.B. der Autoindustrie erprobt und intensiv eingesetzt werden (Abbildung 3). Die Sensoren sind somit getestet und als Massenprodukte auch kostengünstig im Preissegment unter 50 € zu erhalten. Die so durch Bauform und Anschaffungskosten ermöglichte Integration verschiedener, aber auch redundanter Sensorarten (Sensorfusion) kann die Qualität von auf Messwerten basierten Aussagen verbessern. In SLEWS fiel die Auswahl auf den Beschleunigungssensor SCA-3000-D01, den Neigungssensor SCA-100T-D01 und den Drucksensor SCP-1000-D01 des finnischen Herstellers VTI Technologies. Als Seilzugaufnehmer kamen verschiedene Produkte der Firma ASM GmbH zum Einsatz. Systeme zur eigenständigen Positionierung (z.B. über GPS) kamen aufgrund der Unvereinbarkeit des Energieverbrauchs erhältlicher Produkte mit dem stark limitierten Ressourcenumfeld nicht zum Einsatz.

Anhand verschiedener Szenarien wurden die verwendeten Komponenten und Strategien in Labor- und Geländeversuchen im Projektverlauf getestet. Zur Prüfung der Datenstreuung der verschiedenen Sensoren und zwecks Ermittlung der kleinstmöglichen detektierbaren Bewegungsgrößen wurden zunächst im Labor auf Versuchs-

ständen statische und dynamische Tests durchgeführt, d.h. Tests mit und ohne Veränderung der Parameter, um so die Datenschwankung und Datenstabilität der verschiedenen integrierten Sensoren sowie deren Zuverlässigkeit bezüglich der Erfassung auch kleinster Bewegungen von wenigen Grad Neigung bzw. wenigen Millimetern zu ermitteln. Die Werte der Sensoren waren präzise, zeigten geringe Schwankungsbreiten und ermöglichten die Erkennung sehr geringer Veränderungen. Beispielsweise konnte mit dem Neigungssensor noch eine Winkeländerung von $0,1^\circ$ detektiert werden. Mit dem Seilzugwegaufnehmer konnten Spaltenaufweitungen bis 0,01 cm aufgelöst werden. Mit dem Drucksensor war eine Veränderung der Höhenlage von bis zu 0,5 m auflösbar (Arnhardt et al., 2010).

Im Anschluss an die Laborversuche wurden mehrere Geländeversuche durchgeführt, um die Eignung des Systems unter realen Bedingungen zu dokumentieren. Hierzu gehörte zum einen ein Langzeittest im und auf dem Institutsgebäude der Universität in Aachen, um durchgeführte Baumaßnahmen zu dokumentieren. Resultierende Erschütterungen wurden zuverlässig detektiert. Ein weiterer einwöchiger Test erfolgte im Sommer 2009 auf dem Rutschhang Super-Sauze in Südfrankreich. Trotz einer kurzen Dauer konnten Bewegungen mit dem Seilzugwegaufnehmer erfasst werden, die im Abgleich mit Referenzsystemen positiv korrelierten. Diesbezüglich konnte nachgewiesen werden, dass die vorliegende Systementwicklung neben der raschen Installation und Einsatzbereitschaft auch sehr gut für die Erfassung kleinerer Veränderungen geeignet ist. Ein dritter mehrmonatiger Test erfolgte im Winter 2009 nahe der Ortschaft Rathen bei Dresden in der Sächsischen Schweiz. Hier wurde ein kleines Netzwerk aufgebaut, das vor allem mögliche Kippbewegungen im Bereich eines Felsturmes bzw. Spaltenaufweitungen erfassen sollte. Wie bereits in Laborversuchen ermittelt, zeigte dieser Test, dass gerade die Energieversorgung einer weiteren Optimierung bedarf, um auch bei kälteren Bedingungen einen Dauerbetrieb zu gewährleisten.

2.4.4. Sensornetz

Die grundlegende Infrastruktur für das Messnetz stellt ein drahtloses Netzwerk des Herstellers ScatterWeb zur Verfügung. Dieses setzt sich aus einzelnen Sensorknoten (ScatterNodes) zusammen, welche mit Energieversorgung, Schnittstellen für die genannte Sensorik und Funkmodulen der Frequenz 868 MHz ausgerüstet sind (siehe Abbildung 4). Daten werden im Verbund per Multi-Hop-Verfahren im Division Time Multiple Access (TDMA) Zugriffs- und Low-Power Scatter-Route (LPSR)-Routingverfahren von Knoten zu Knoten übertragen. Große Entfernungen zwischen Sensorknoten und Datensinke können so energieeffizient überwunden werden. Sendeleistungen werden so optimiert bzw. herab geregelt, dass eine Kommunikation bis zum nächsten Knoten gegeben ist. Weitere Varianten sehen Netzknoten ohne Messsensoren vor, die nur der Kommunikation und Verwaltung dienen. Mittels Methoden wie Selbstheilung und ad hoc Selbstorganisation reagiert das Netzwerk auf Knotenausfälle und Störungen (Abbildung 5). Die Datensinke (ScatterGate) ist für

die Administration des Netzwerks zuständig und stellt die Schnittstelle zwischen Sensornetz und externen Anwendungen per GSM/GPRS oder serieller Kabelverbindung dar.

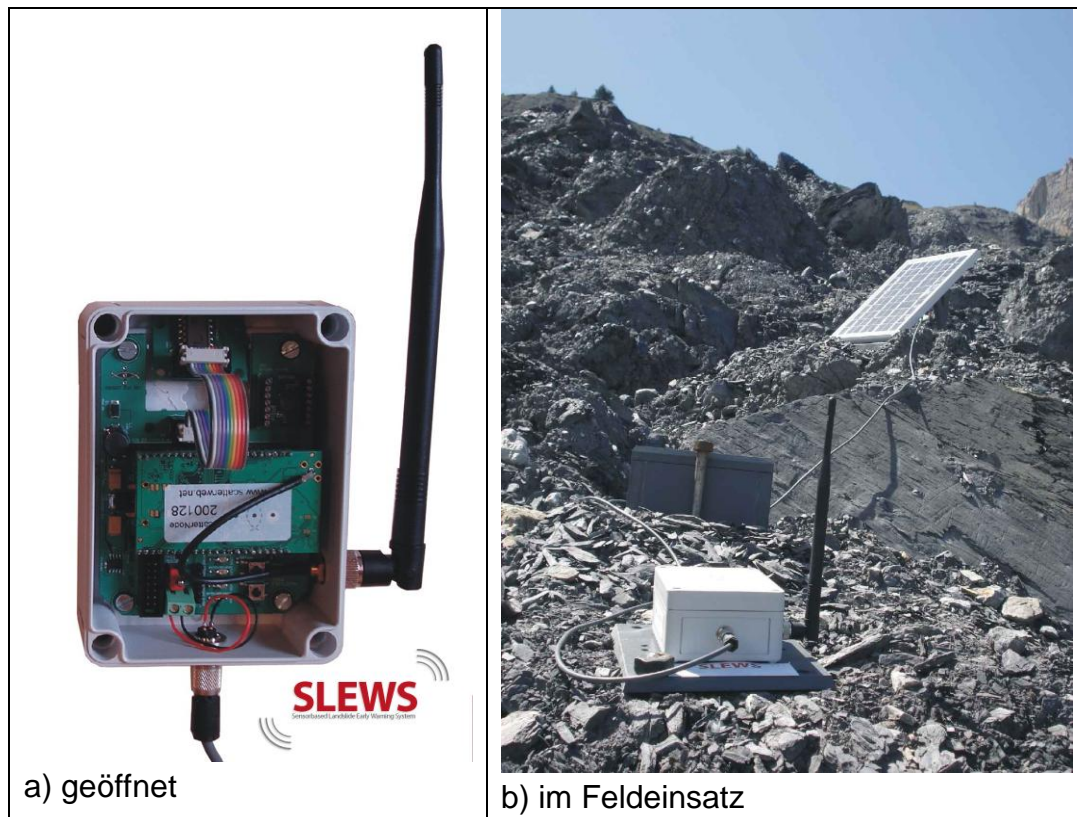


Abbildung 4: SLEWS-Sensorknoten (SLEWS, 2011)

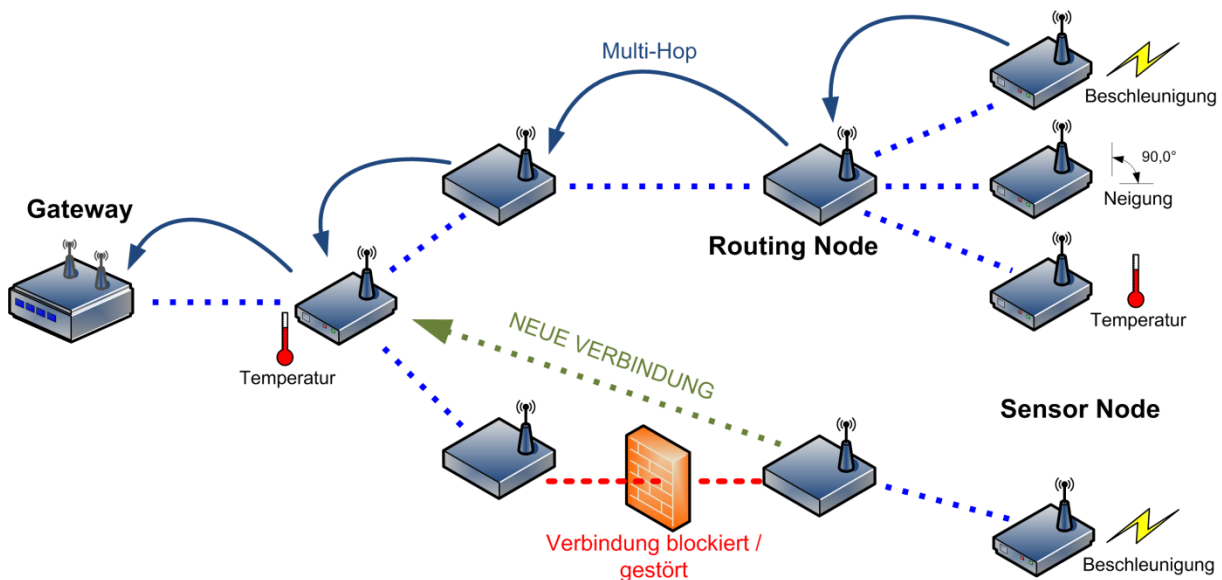


Abbildung 5: Aufbau und Organisation des SLEWS-Sensornetzes (SLEWS, 2011)

2.4.5. Datenaufbereitung und -auswertung

In einem weiteren Schritt galt es, die Verbindung der Datenerfassung mit einer dienstebasierten Geodateninfrastruktur unter Einbezug von OGC-Spezifikationen der SWE-Initiative herzustellen. Ziel des an der Professur für Geodäsie und Geoinformatik federführend bearbeiteten Teilbereichs war es, die spezialisierten Daten der Testmessnetze von hersteller- und anwendungsspezifischen Formaten und Schnittstellen zu entkoppeln und syntaktisch und semantisch interoperabel zur Verfügung zu stellen, um Verarbeitungsketten von der Sensormessung bis zum Informationsprodukt flexibel und effizient gestalten zu können. Hierfür wurde die Schnittstelle des Sensorsystems mit der räumlich getrennten Datenbereitstellung der GDI gekoppelt, um Informationen über das Sensorsystem und Sensordaten in standardisierte Austauschformate umwandeln zu können. Bereitstellung und Austausch dieser Daten wurde über die Dienstschnittstellen eines implementierten OGC Sensor Observation Service (SOS) verwirklicht. Weiterhin wurden in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern Konzepte zur Erstellung von situationsbedingten und nutzerspezifischen Benachrichtigungsmethoden und Informationsprodukten erarbeitet.

2.4.6. Informationsverarbeitung und -verteilung

Ein wichtiger Fokus des Projekts mit direktem Einfluss auf die technische Konzeption lag auf der Erarbeitung und Analyse der Schnittstelle zu den Endnutzern des Frühwarnsystems und zu den politischen Entscheidungsträgern, welches im Projekt in der Verantwortung des BGR lag. Die Integration des Systems in vorhandene Netzwerkstrukturen und die Anbindung an andere Frühwarnsysteme sowie die Integration der gewonnenen Forschungsergebnisse in nationale, eventuell auch in europäische und internationale Programme bildete einen weiteren wesentlichen Bestandteil. Die Identifizierung von Endnutzergruppen gestaltete sich sehr schwierig, als mögliche Kandidaten wurden jedoch Straßen- und Autobahnmeistereien, die Deutsche Bahn, Wasser- und Schifffahrtsämter und die Geologischen Dienste der Länder ermittelt und kontaktiert. Auch für den im Rahmen des Projekts organisierten Workshop „Warn- und Risikomanagement bei Massenbewegungen“, der im Juni 2009 im Hause der BGR stattfand, wurden die genannten Institutionen eingeladen. Ergebnisse dieser Bemühungen und Auswertungen einer Umfrage per Fragebogen führten zu einer Reihe von Pflichtmerkmalen, die in die Konzipierung der technischen Schnittstelle zwischen System und Endnutzer einfließen.

2.4.7. Wissenschaftlicher Beitrag des Projekts SLEWS

Im Folgenden soll der wissenschaftliche Beitrag und Innovationsgehalt des Projektansatzes, wie z.T. durch diese Arbeit vorliegend, erläutert werden. Insbesondere soll dabei aufgezeigt werden, welche offenen Fragestellungen behandelt wurden und welche herrschenden Umstände dadurch verbessert werden können. Erweitert wird das Feld der untersuchten Einsatzmöglichkeiten von modernen Sensornetzwerken

und offenen Schnittstellenstandards im Risikomanagement und Geomonitoring gravitativer Massenbewegungen. Auf Seiten der Datenerfassung konnten wesentliche Fortschritte durch Nutzung preisgünstiger präziser MEMS erzielt werden, deren Ergebnisse mit denen hochspezialisierter und preisintensiver Systeme vergleichbar sind und deren Datenqualität durch die Anwendung des Prinzips der Sensorfusion weiterhin aufgewertet werden kann. Die Kombination mit einer robusten und einfach auszubringenden Infrastruktur bei verhältnismäßig geringen Betriebs- und Instandhaltungskosten erschließt ein im Vergleich zu konventionellen Systemen sehr breites Feld an Anwendungsmöglichkeiten. Am Beispiel des Geländetests in Rathen bei Dresden zeigte sich der Mehrwert des Systems deutlich, indem die bis zu diesem Zeitpunkt epochal durchgeführte Überwachung des Felssturms (ein bis zwei Messungen pro Jahr) durch eine kontinuierliche Erfassung ergänzt werden konnte. Vorteile in diesem geologisch sehr aktiven Gebiet (SZ Online, 2009) sind naheliegend.

Auf Seiten der Informationsauswertung und –verarbeitung stellt der Anspruch der Umsetzung „von Sensormessungen zur Frühwarnung in Echtzeitnähe unter Verwendung einer dienstebasierten Informationsinfrastruktur“ eine Neuerung dar. Eine Weiterentwicklung in Bezug auf klassische Informationssysteme im Bereich Umwelt- und Geomonitoring ist durch die Möglichkeit gegeben, flexibel unterschiedliche Datenquellen und Kommunikationspfade für die Auswertung, Analyse, sowie das Absetzen von Informationen und Benachrichtigungen zu kompilieren. Im Gegensatz zu monolithischen Systemarchitekturen, die auf speziellen Charakteristika der verwendeten Sensorsysteme und der IuK-Infrastruktur basieren, verfolgt das Projekt den Ansatz, Informationsprodukte dynamisch aus einer Reihe von untereinander austauschbaren Informationsressourcen zu kombinieren. Die Verknüpfung dieser heterogenen Daten kann durch verschiedenste Anbieter aufgrund einer offenen, standardisierten Architektur erfolgen.

Ein praktischer Hintergrund liegt in der Bestrebung eines bidirektionalen Informationsaustauschs mit anderen wissenschaftlichen Bereichen, die einen ähnlich interoperablen Ansatz verfolgen. Insbesondere Forschungsprojekte können stark von der Vernetzung von Sensoren und Datenquellen zur Umweltforschung profitieren. Der Aufbau und Unterhalt von Sensornetzen ist aufwändig und teuer, die zeitliche und räumliche Abdeckung von Feldtests somit begrenzt. Gewonnene Daten gelangen nur selten über die Grenzen fachlicher Anwendungsbereiche heraus und in vielen Fällen nur als endgültig verarbeitete Informationsprodukte. Gerade jedoch die Bereitstellung von Ausgangsdaten, zusammen mit der Möglichkeit, diese ohne Detailwissen ausfindig machen zu können, verhilft zur Nutzung des vollen Potentials und zur Schaffung von Mehrwerten.

Aus Nutzersicht ermöglicht der Ansatz die Bereitstellung spezifischer Informationen für jeden Beteiligten in einer frühen Phase des Ereignisablaufes unabhängig von einer hierarchischen Informationsstruktur. Zwar gestaltete es sich aufgrund fehlender Zuständigkeiten und Ansprechpartner für Massenbewegungen als schwierig, gezielte Endnutzergruppen für SLEWS eindeutig zu bestimmen, dennoch zeigten die Unter-

suchungen, dass generierte Informationen und Warnungen unterschiedliche Zielgruppen betreffen. Aus sozialwissenschaftlicher Sicht sind damit auch unterschiedliche soziale Systeme betroffen und unterschiedliche Handlungen verknüpft. Dies hat zur Folge, dass bei der Entwicklung von Schnittstellen verschiedene Aspekte berücksichtigt werden müssen, die auf die Reaktion dieser Zielgruppen abzielen. Hieraus ergeben sich direkte Vorgaben für die technische Gestaltung von Informationsprodukten. Zusammenfassend stellten sich bei der Befragung jedoch eindeutige Gemeinsamkeiten der Anforderungen an das System heraus.

Ansprüche wurden dabei vor allem an größtmögliche Transparenz und modulare Integrierbarkeit der Datenquellen gestellt. Die direkte Entwicklung und Implementierung von spezifischen Auswertelgorithmen für bestimmte Typen von Massenbewegungen wurde weitgehend abgelehnt. Es hat sich gezeigt, dass zunächst die technische Umsetzung, der operative Nachweis der Funktionstüchtigkeit und der Genauigkeit des Sensornetzwerkes für die Endnutzer einen wesentlich höheren Stellenwert hat und die eigentliche Einführungshürde darstellt. Zudem ist es den Endnutzern wesentlich wichtiger, dass das System an bestehende oder individuell präferierte Dateninfrastrukturen und Auswertelgorithmen im Einzelfall angebunden werden kann, als alles aus einer Hand zu bekommen. Detaillierte Ausführungen und Ergebnisse zu diesen Bereichen sind ab Kapitel 4 und in (SLEWS, 2011) zu finden.

Aus technischer Sicht relevant und ein zentraler Beitrag dieser Arbeit ist die genaue Betrachtung der Implementationshürden beim Einsatz räumlicher Dienststandards aus dem Umfeld des OGC in Überwachungs- oder Frühwarnsystemen. Die Umsetzbarkeit auf beiden Seiten der Diensteebene, die Einbringung und Formalisierung von Seiten des Sensoranbieters sowie die Orchestrierung von Diensteressourcen zu einem nutzerzentrierten System werden dabei untersucht. Ein Informationszugewinn ist sowohl für Sensor- und Frühwarnsystembetreiber, weitere mögliche Nutzergruppen des SLEWS sowie für Sensorhersteller angestrebt. Der Rückfluss an Erkenntnissen in die laufenden Entwicklungen der SWE-Initiative des OGC zur Etablierung moderner räumlicher Webtechnologie und zur Einbeziehung des Internets als Makroinstrument zur Umweltforschung ist ebenfalls angedacht.

3. Basistechnologien für Geodateninfrastrukturen und Sensor Web

Im Folgenden sollen Schlüsseltechnologien und deren Hauptmerkmale aufgeführt werden, die die moderne (räumliche) Informationsverarbeitung maßgeblich prägen und die die beschriebenen Forschungen in den Bereichen Geomonitoring und Geosensornetze zunehmend beeinflussen.

3.1. Service Oriented Architecture und Web Services

Serviceorientiertes Design bzw. serviceorientierte Architektur (SOA) beschreibt ein Paradigma zur Organisation und Nutzung verteilter Ressourcen über ein Netzwerk (OASIS, 2006). (Bloomberg, 2004, S.4) umschreibt SOA wie folgt:

„Service orientation is a way of viewing software assets on the network - fundamentally, the perspective of IT functionality being available as discoverable Services on the network. Essentially, Service orientation provides business users with understandable, high-level business Services they can call upon and incorporate into business processes as needed.“

Auf SOA basierte Systeme können über Dienste die gleiche Funktionalität wie monolithische Systeme bereitstellen, bringen aber zusätzliche Vorteile mit sich. Hierzu zählt vor allem die Integration bestehender konventioneller Anwendungen in einen neuen Funktionskontext, größere Flexibilität bei durch Wachstum bedingter Skalierung des Gesamtsystems und die einfache Entwicklung neuer Funktionalität für ein bestehendes System durch die modulare Entwicklung neuer Teilkomponenten (OGC, 2004).

SOA stellt kein neues Konzept dar, jedoch unterscheidet sich der aktuelle Ansatz der Webservices von früheren wie z.B. der Common Object Request Broker Architecture (CORBA) und dem Distributed Component Object Model (DCOM) durch einen höheren Grad an Standardisierung. Laut Definition des World Wide Web Consortium (W3C, 2004) ermöglichen Webservices die standardisierte Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Softwareanwendungen, die auf einer unterschiedlichen Reihe von Plattformen und/oder Frameworks betrieben werden können. Schlüssel hierzu liegt vor allem in der Verwendung offener, anerkannter und allgegenwärtig verfügbarer Standards wie dem Hypertext Transfer Protocol (HTTP) zur Übertragung und der eXtensible Markup Language (XML) zur Darstellung von Daten über ein Netzwerk. Die Kombination von Webservices und SOA verbessert frühere Konzepte durch drei wesentliche Aspekte. (Bloomberg, 2004) beschreibt diese wie folgt:

Loose Coupling: Änderungen an Teilkomponenten einer Architektur können unabhängig voneinander durchgeführt werden. In früheren Ansätzen mussten Änderun-

gen mit Rücksicht auf alle Komponenten des Gesamtsystems geplant werden (tight coupling). Für die Zusammenarbeit von Webservices ist es hingegen nur erforderlich, dass sie auffindbar sind und auf entsprechenden Standards beruhen. Zur Erläuterung: Auffindung und Einbeziehung von Funktionen zur Laufzeit werden durch die Umsetzung des SOA-basierten Prinzips „Publish-Find-Bind“ realisiert. Dienste werden über ein Verzeichnis veröffentlicht, über welches Dienstenehmer zu geeigneten Diensteressourcen verwiesen werden.

Coarse Granularity: Anstatt Kommunikation über viele detailorientierte Funktionsaufrufe einer API (Application Programming Interface) zu betreiben, werden Nachrichten zwischen Webservices in wenige robuste und grobgranulare Einheiten aufgeteilt. Als Beispiel wäre der Vorgang einer Hotelbuchung zu nennen, bei der alle benötigten Informationen - statt einzelne Details in separaten Funktionsaufrufen - in einer gekapselten Nachricht kommuniziert werden.

Asynchrony: Die Nutzung von Webservices kann neben dem synchronen auch den asynchronen Austausch von Nachrichten zwischen Dienstenehmer und Dienst unterstützen. Ein synchroner Austausch kann eine Anwendung in der Zeit zwischen Anfrage und Antwort blockieren. Ein Beispiel hierfür ist die Wartezeit beim Abschicken eines Formulars einer Webanwendung (nicht gleichzusetzen mit Webservice). Ein asynchroner Austausch ermöglicht hingegen das Weiterarbeiten einer Anwendung während auf eine Antwort gewartet wird. Ein Beispiel hierfür ist die dynamische Verifizierung der Zahlungsmodalitäten während der Nutzer mit dem Ausfüllen des Formulars einer Hotelbuchung fortfahren kann. Als Synonym für dieses Konzept wird in der Programmierung häufig der Begriff AJAX (Asynchronous JavaScript and XML) verwendet.

Mit SOA und Webservices implementierte Anwendungen realisieren nicht immer zwangsläufig alle genannten idealen Eigenschaften, dennoch profitieren sie durch den gebotenen Zuwachs an Flexibilität. Zeitgenössische Webanwendungen verschiedener großer Anbieter zeigen einen deutlichen Trend hin zur Nutzung von Webservices. Während z.B. das Unternehmen Amazon bereits über 100 Dienste zur Bereitstellung seiner Funktionalitäten und Dienstleistungen verwendet (Korduan, 2011), bietet Google eine inzwischen fast unüberschaubare Anzahl an webservice-basierten Anwendungen an, deren Funktionsumfang und Komplexität bisher nur von Server- und Desktop-Softwareprodukten bekannt war. Eine Weiterentwicklung dieser Bestrebungen ist in Form des Cloud- bzw. Grid-Computing zu sehen, dessen Konzept das Angebot von Hard- und Softwareressourcen über (internetbasierte) Netzwerkdienste umfasst (hardware/software as a service, siehe Mell & Grance, 2009).

Als anwendungsfallspezifische Alternative zum SOA-basierten Design ist das in den vergangenen Jahren immer häufiger verwendete Designprinzip Ressource-Oriented Architecture (ROA, Fielding, 2000) zu nennen. ROA kann unter Verwendung des Representational State Transfer (REST)-Paradigmas als Variante einer SOA gesehen werden und umfasst, statt Aufruf von Informationen über funktionsbasierte Aufruf-

fe, die direkte Adressierbarkeit von Informationsressourcen über das Internet mithilfe des HTTP-Protokolls. Die Nutzung von REST wird dabei als wichtiges Mittel zur Umsetzung aktueller Bestrebungen zur Schaffung des Linked Data-Ansatzes (Bizer et al., 2009) und des Semantic Web (Egenhofer, 2002) gesehen.

3.2. Standardisierung der räumlichen Datenverarbeitung

Die computergestützte Verarbeitung räumlicher Daten durch Geo-Informationssysteme (GIS) entwickelte sich seit den 1960er Jahren und war lange Zeit durch die Verwendung monolithischer Architekturen und proprietärer Technologie geprägt. Datenbestände und Verarbeitungsmethoden verschiedener Parteien waren somit oft voneinander isoliert. Durch die enge Bindung von GIS zu Informations- und Kommunikationstechnologie und Informatik, ein Bereich der heute von der wissenschaftlichen Disziplin der Geoinformatik abgedeckt wird, verlaufen Entwicklungen in beiden Bereichen parallel (Bill, 2010). Die vor allem durch Internet und World Wide Web (WWW) angeschobene Informationsrevolution beeinflusste auch die technischen Möglichkeiten und führte zu erhöhten Ansprüchen an den (kosten)effizienten Umgang mit räumlichen Daten (OGC, 2005a):

- Verbesserung der Zugänglichkeit und des Austauschs von Daten und Herabsetzung technischer Einstiegshürden
- Erhöhung von Qualität, Nachhaltigkeit und Mehrwert von Daten
- Abkopplung von herstellereinspezifischen monolithischen Technologien hin zu interoperablen und flexiblen Anwendungen

Die erläuterte Nutzung von Webservices als Basis für offene Standards prägt seit Ende der 1990er Jahre maßgeblich den interoperablen Umgang mit räumlichen Daten. Als prominentes Beispiel ist die Web Map Service-Spezifikation (WMS) des Open Geospatial Consortium (OGC) zu nennen, die die Umsetzung eines spezialisierten Webservices zum Austausch von kartenbasierten Informationen beschreibt. Die Entwicklung des Standards begann im Jahr 1998 als erstes Konzept, reifte bis zum Jahr 2000 zur Spezifikation in der Version 1.0 und wurde später als ISO-Norm 19128 normiert. Die Verbreitung und Umsetzung dieses Standards hat seitdem die Verfügbarkeit von webbasierten Kartenanwendungen und dadurch von räumlichen Informationsprodukten in verschiedensten Anwendungsbereichen wesentlich gefördert.

Das OGC, im Jahr 1994 unter dem Namen Open GIS Consortium gegründet, beschäftigt sich mit der Entwicklung solcher freier Standards zur Verbesserung der Interoperabilität raumbezogener Informationsverarbeitung. Hierbei vermittelt es den Schulterschluss zwischen de jure Normen der Geoinformatik (z.B. formuliert durch das ISO Technical Committee 211) und den de facto Internetstandards der allgemeinen Informatik (z.B. formuliert durch das World Wide Web Consortium). Zu den über

330 Mitgliedern des offenen und demokratisch geführten Zusammenschlusses gehören Regierungsorganisationen, private Wirtschaftsunternehmen und Universitäten.

Im Rahmen der Arbeiten des OGC entstanden eine Reihe einschlägiger Dienste- und Formatspezifikationen für verschiedene Aspekte im Umgang mit Geodaten, die bis auf amtlicher bzw. gesetzlicher Ebene (ALKIS, XPlanung, INSPIRE) Verwendung finden. Hierzu zählen u.a. der Web Feature Service (WFS) zusammen mit seiner Begleitspezifikation Geography Markup Language (GML) zur Codierung von räumlichen Daten, der Web Coverage Service (WCS), der Catalogue Service Web (CS-W) und der Web Processing Service (WPS) (vgl. auch Bill, 2010, S.224ff und OGC, 2011a). In ihrer Funktion und Bedeutung haben sich OGC Webservices zu wesentlichen Grundbestandteilen von Geodateninfrastrukturen entwickelt.

3.3. Geodateninfrastruktur (GDI)

Die Verfügbarkeit räumlicher Informationen stellt in verschiedensten Bereichen, wie z.B. dem Katastrophenschutz, eine unverzichtbare Grundlage zur Entscheidungsfindung auf lokaler, regionaler wie auch globaler Ebene dar (GSDI, 2009). Die inzwischen vermehrt vorhandene Geoinformation kann somit als eine Ressource bzw. ein Gut angesehen werden, welches bereitgestellt, verwaltet und aktuell gehalten werden muss (Bill, 2010).

Das Fehlen einheitlicher Umgangsformen erschwert den Datenaustausch zwischen Parteien und führt zu parallelen und kostenineffizienten Bemühungen in der Sammlung, Verarbeitung und Verwaltung von Geodaten. Die Haltung und Wartung von redundanten Datensätzen ist unausweichlich und führt zu Anwendungen, Produkten und Formaten jenseits jeder Überschaubarkeit. Die Einigung auf die gemeinsame Nutzung von Regelungen zur Schaffung einer Infrastruktur für den Umgang mit Geoinformationen führt zur Steigerung von Wertschöpfung und Nachhaltigkeit von Geodatenbeständen. Der Begriff Infrastruktur ist hierbei bewusst gewählt und soll eine Analogie zu Infrastrukturen wie dem Straßen- oder Telekommunikationsnetz aufweisen. Es ist die Rede von einer zuverlässigen Basis, die einen minimalen Umfang an Standards, Spezifikationen und Protokollen verwendet, um den Austausch von Geodaten zu unterstützen. Ebenso wie eine Straße oder eine Kupferleitung soll ein solches Netzwerk die Beförderung von einer beliebig skalierbaren Form von Transporteinheiten ermöglichen. Der Begriff Geodateninfrastruktur (GDI) wird wie folgt definiert:

“Eine Geodateninfrastruktur ist ... eine aus technischen, organisatorischen und rechtlichen Regelungen bestehende Bündelung von Geoinformationsressourcen, in der Anbieter von Geodaten und Geodiensten mit Nachfragern solcher Dienste kooperieren. ...” (Bill, 2010, S. 232)

“An SDI (Spatial Data Infrastructure) must be more than a single data set or database; an SDI hosts geographic data and attributes, sufficient documentation (metadata), a means to discover, visualize, and evaluate the data (catalogues and Web mapping), and some method to provide access to the geographic data.” (GSDI, 2009)

Zusammenfassend umfasst eine GDI die rechtlichen, technischen und organisatorischen Vereinbarungen um den Austausch zwischen Anbietern und Nutzern von Geodaten zu vereinheitlichen. Die Kernfunktionen sind dabei:

- Integration heterogener und verteilter Datenquellen
- Dokumentation der Beschaffenheit der zur Verfügung stehenden Daten und deren Auffindung durch Metadaten
- Möglichkeit zur Bewertung der Daten wie z.B. durch Visualisierung
- Möglichkeit eines direkten Zugriffs bzw. Verarbeitung

Bemühungen zum Aufbau von Geodateninfrastrukturen werden auf regionaler, nationaler und internationaler Ebene betrieben. Beispiele finden sich in allen entwickelten Nationen, so z. B. die US National Spatial Data Infrastructure (NSDI), das National Clearinghouse for Geoinformation (NCGI) in den Niederlanden oder das UK National Geospatial Data Framework. Als einheimische Vertreter sind z.B. die GDI-Vorhaben der Bundesländer (z.B. GDI-MV oder GDI-NI) sowie die bundesübergreifende Geodateninfrastruktur Deutschland (GDI-DE) zu nennen. Auf europäischer Ebene ist das seit dem Jahr 2001 vorangetriebene Basisvorhaben Infrastructure for Spatial Information in Europe (INSPIRE) zu nennen. Die am 15. Mai 2007 in Kraft getretene INSPIRE-Richtlinie der Europäischen Union dient der Schaffung einer einheitlichen Geodateninfrastruktur in den Mitgliedsstaaten, um die Ziele des sechsten Umweltaktionsprogramms (Beschluss Nr. 1600/2002/EG) erfüllen zu können (Bill, 2010). Die Umsetzung der Vorgaben der INSPIRE-Richtlinien wird eng mit den Lenkungsgrmien aller Mitgliedstaaten (wie z.B. GDI-DE) koordiniert. Die Nutzung etablierter Normen und Standards aus den Bereichen der allgemeinen Informationstechnologie und des Geoinformationswesens spielt eine zentrale Rolle. Standards des OGC kommen dabei verstärkt zum Einsatz (GDI-DE, 2007).

3.4. OGC Sensor Web Enablement

Die umfassende Digitalisierung der Erdoberfläche mit Sensoren verspricht eine zunehmende Verkleinerung der bestehenden Lücke zwischen Umweltforschung und Informationstechnologie unter der Voraussetzung, gesammelte Informationen nachhaltig zur Interpretation nutzbar machen zu können. Entsprechende Quellen stehen in Form einer fast unüberschaubaren Allgegenwärtigkeit von Sensoren und verbundenen Informationsprodukten bereit, können bisher jedoch nur begrenzt genutzt werden. Ein zentrales Problem besteht darin, dass Sensordaten für Außenstehende meist nur schwer auffindbar sind, da sie nur selten so referenziert vorliegen, dass sie

vom Menschen durch intuitiv formulierte Suchanfragen erfasst werden können. Selbst bei einem Auffinden entsprechender Datensätze ist eine effektive Verwertung fraglich, da diese häufig in spezialisierten anwendungsspezifischen Formaten vorliegen, deren Auswertung und korrekte Interpretation detailliertes Fachwissen erfordert. Um den automatisierten Zugriff von Mensch und Maschine zu gewährleisten, ist somit die syntaktische und semantische Vereinheitlichung von Sensordaten notwendig. Die anwendungsübergreifende Vernetzung von einzelnen Sensoren, Sensorsystemen, Sensornetzwerken (siehe Abbildung 6) und zugehörigen Datenquellen durch die Nutzung des Internets als gemeinsame Kommunikationsinfrastruktur in Form eines Sensor Web (Delin, 2002, Liang et al., 2005) stellt dafür eine wichtige Voraussetzung dar und wird in unterschiedlichen Anwendungsbereichen intensiv erforscht.

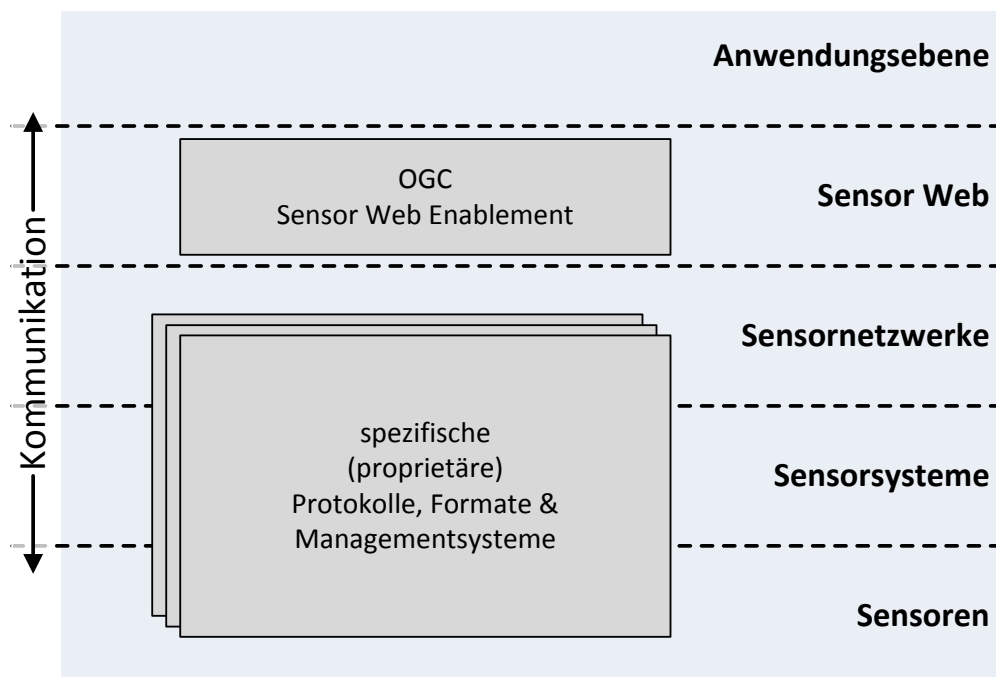


Abbildung 6: Schichtenmodell der Vernetzung von Sensoren von der Hardware- bis zur Anwendungsebene

Die Sensor Web Enablement-Initiative (OGC, 2007), Ende der 1990er Jahre aus Forschungsvorhaben der NASA initiiert, beschäftigt sich mit der internetbasierten Einbeziehung von Sensoren in Geodateninfrastrukturen. Die SWE-Spezifikationsreihe definiert Diensteschnittstellen und Datenformate (Tabelle 3 und Tabelle 4), die verschiedene Aspekte im Umgang mit Sensoren umfassen. Hierzu zählen der Zugriff auf Messdaten, die Recherche von Metainformationen zu Sensorbeschaffenheit und Messbedingungen, die Vermittlung von Nachrichten und Alarmen sowie die Steuerung. Ziel ist es, diesen Funktionsumfang, unabhängig von Details der eigentlichen Umsetzung, standardisiert über das Internet verfügbar zu machen (siehe Abbildung 7). SWE-Spezifikationen wurden dabei gezielt nicht für die Hardwareebene konzipiert, um dort etablierte Standards zu verbessern bzw. zu ersetzen. Dies wäre aufgrund der großen Anzahl hochspezialisierter und z. T. proprietärer Sensorsysteme auch kaum umzusetzen. Vielmehr dienen sie der Umhüllung systemspezifischer Details und bilden eine interoperable Middleware zwischen Hardware- und Anwen-

dungsebene. Die resultierende Entkopplung von Datenursprung und dem interoperablen Zugriff soll eine freie Gestaltung des zwischenliegenden Datenmanagements nach sich ziehen. Verschiedensten Anwendungen, von spezialisierten GI-Systemen bis hin zu einfachen Webbrowsern, wird es somit ermöglicht, Sensordaten aufzufinden und gegebenenfalls mit Sensoren „Plug&Play“-artig direkt zu interagieren, ohne dass Vorwissen von Seiten des Benutzers erforderlich wäre.

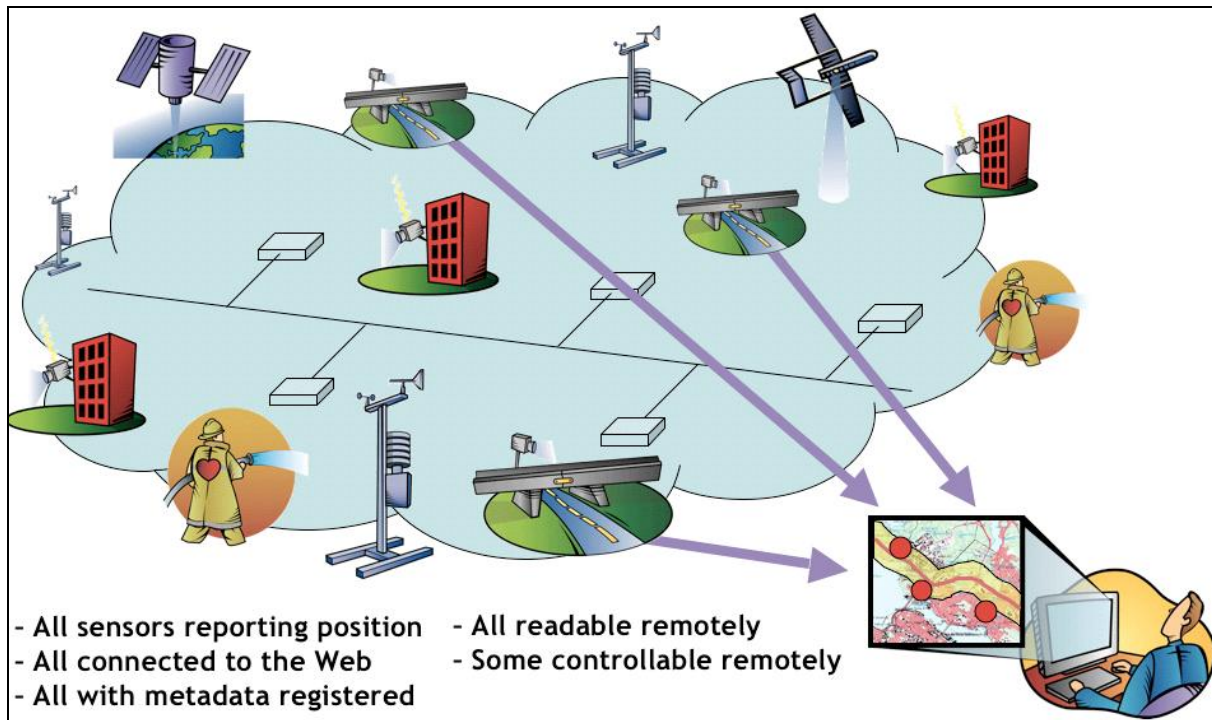


Abbildung 7: Vision der SWE-Initiative zur Vernetzung von Sensordaten (OGC, 2007)

Im Folgenden soll eine Übersicht über die wichtigsten Dienste- und Formatspezifikationen der SWE-Initiative gegeben werden.

3.4.1. OGC SWE-Dienste

Tabelle 3: Übersicht der SWE-Dienstespezifikationen (Stand 1. Quartal 2012)

Spezifikation (Version)	Beschreibung
Sensor Observation Service (Version 1.0.0)	Dienst zum Zugriff auf Messdaten und Sensorinformationen
Sensor Planning Service (Version 1.0.0)	Dienst zur Steuerung von Sensoren bzw. zur Anforderung von nutzerspezifischen Datenanfragen
Sensor Alert Service (Version 0.9.0) / Sensor Event Service (Version 0.3.0), Web Notification Service (Version 0.0.9)	Dienste zum Bezug von ereignisbasierten Sensormeldungen und Alarmen (Standards bisher nicht verabschiedet)

Sensor Observation Service:

Der Sensor Observation Service (SOS) stellt den Kern der SWE-Spezifikationsreihe dar. Der Standard umfasst webbasierte Schnittstellen zum Auffinden und zum Zugriff von echtzeitlichen und archivierten Messdaten. Laut Standardspezifikation (OGC, 2007a) unterstützt der SOS den Umgang mit verschiedensten Sensorarten (mobil, stationär, in-situ, synthetisch). Austauschformate des SOS können in zwei verschiedenen Varianten auftreten. Während Messdaten im XML-basierten Format Observations&Measurements (O&M) vorliegen, werden beschreibende Metainformationen zu Beschaffenheit des Sensors und zur Entstehung der Messbeobachtungen im XML-basierten Format Sensor Model Language (SensorML) verfasst. Der Funktionsumfang eines SOS wird in drei Profile unterteilt (Core, Transactional, Enhanced), wobei nur die Umsetzung des Kernprofils (Core) vom Standard als verpflichtend vorgeschrieben ist. Das Kernprofil umfasst die Operationen *GetCapabilities*, *DescribeSensor* und *GetObservation*. Die Verwendung dieser Operationen kann in einem einfachen Anwendungsfall von Seiten des Nutzers eines SOS wie folgt geschildert werden (siehe auch Abbildung 8):

Nach dem Ausfindigmachen einer SOS-Instanz ermöglicht der beispielhafte HTTP-Aufruf (Methode GET) der Operation *GetCapabilities* in der Form

<http://beispiel.url/beispielSOS/sos?REQUEST=GetCapabilities&SERVICE=SOS>

den Abruf eines XML-Dokuments, dessen Inhalt den Dienst ausführlich beschreibt. Die Verwendung der *GetCapabilities*-Operation ist dabei einheitlich bei allen Diensten des OGC-Umfelds und versetzt den Nutzer in die Lage, sich über die zur Verfügung stehende Schnittstellenfunktionen und Informationsressourcen des Dienstes zu informieren. Im Falle des SOS umfassen diese Informationen Angaben zu registrierten Sensoren sowie raum-zeitlichen Parametern der angebotenen Messdaten. Über den Aufruf der Operation *DescribeSensor* können durch die Rückgabe eines SensorML-Dokuments Beschreibungen zu einzelnen Sensoren, Sensorsystemen oder Datenproduzenten eingeholt werden. Im Anschluss kann der Nutzer durch Aufruf der Operation *GetObservation* gezielt Messdaten, gefiltert nach raum-zeitlichen Parametern (OGC Filter Encoding, OGC, 2010a), über ein O&M-Dokument abrufen.

Während das Enhanced Profile die Operationen des SOS um weitere spezifischere Abfragemöglichkeiten erweitert, implementiert das Transactional Profile die beiden Operationen *RegisterSensor* und *InsertObservation*, die es ermöglichen, Messdaten und Sensorbeschreibungen von Seiten des Nutzers per O&M- bzw SensorML-Dokument in den Datenbestand des SOS über HTTP-Aufruf einzupflegen.

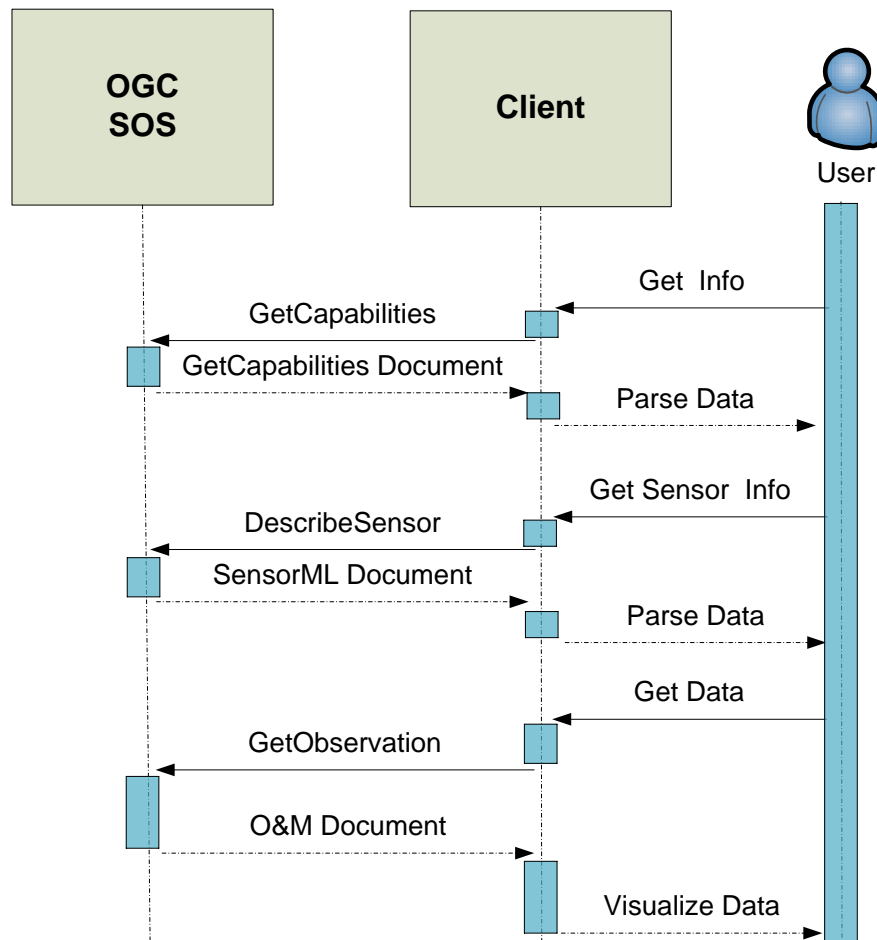


Abbildung 8: Sequenzdiagramm der Datenabfrage zwischen Anwendung und SOS

Sensor Alert Service

Der Sensor Alert Service (SAS) stellt ein System zur asynchronen ereignisbasierten Nachrichtenübermittlung dar, welches den Funktionsumfang der SWE-Spezifikationsreihe um die PUSH-basierte Kommunikationsform ergänzt (OGC, 2006). Nutzer können so aktiv über Entwicklungen von Messwerten informiert werden, ohne dabei kontinuierlich Messdaten vom SOS anfordern zu müssen (PULL-basierte Kommunikation). Sensorsysteme bzw. Datenproduzenten auf der einen und interessierte Nachrichtenempfänger auf der anderen Seite werden dafür am SAS registriert. Durch vorherige Abfrage der Ressourcenbeschreibung über die *GetCapabilities*-Operation bringt der potentielle Nachrichtenempfänger benötigte Informationen wie z.B. Beobachtungsort, beobachtete Eigenschaft, Wertebereich, Benachrichtigungsstruktur etc. in Erfahrung, die zuvor durch die *Advertise*-Operation von Sensoren bzw. Datenproduzenten zur Verfügung gestellt wurden. Durch eine *Subscribe*-Operation registriert sich ein Nachrichtenempfänger u.a. durch Angabe von Sensoridentifikation und Resultatfilter (z.B. Messwert ist größer oder kleiner als Parameter X) für die Nachrichten eines Sensors.

Sich wiederholende Kommunikation zwischen Sensor und SAS (*Publish*) sowie Empfänger und SAS (*Alert*) findet, neben o.g. einmaligen HTTP-Operationen, laut Spezi-

fikation über sogenannte Multi-User Chats (MUC) statt, die über das weit verbreitete Extensible Messaging and Presence Protocol (XMPP) realisiert werden.

Web Notification Service

Der Web Notification Service (WNS) stellt ein System zur asynchronen ereignisbasierten Nachrichtenübermittlung dar (OGC, 2006a) und ist als Begleitspezifikation zum SAS zu betrachten. Als Protokollwandler ist sein Einsatzzweck die Überbrückung von Kommunikationskanälen zum Nachrichtenempfänger (last-mile-mode). Nachrichten des SAS können so in verschiedene andere Formate (z.B. Email, SMS, Common Alert Protocol, etc.) umgewandelt werden, um so den Kommunikationsgewohnheiten eines Nutzers optimal entgegenzukommen. Das Zusammenspiel zwischen SAS und WNS ist auf Spezifikationsebene abgestimmt, so dass ein Nachrichtenempfänger bereits bei der Registrierung am SAS über die *Subscribe*-Operation die Nutzung eines WNS vermerken kann. Die dafür notwendigen Informationen können zwischen Nutzer und WNS zuvor über die Operationen *GetCapabilities* und *Register* ausgetauscht werden. Über Aufruf der *DoNotification*-Operation werden Nachrichten per HTTP-Protokoll vom SAS an den WNS übermittelt, die anschließend in ein vom Dienst unterstütztes Protokoll umgewandelt und an einen Endpunkt (z.B. Email-Adresse, Telefonnummer) versendet werden können.

Sensor Planning Service

Ein Sensor Planning Service (SPS) dient als System zur Verarbeitung nutzerspezifischer Anfragen zur Erfassung von Daten, denen ein Sensor im Rahmen seiner Einsatzmöglichkeiten nachkommen kann (OGC, 2007b). Abhängig von Funktionen, die über einen SPS für Nutzer zur Verfügung stehen, werden verbundene Sensoren gegebenenfalls von außen fernsteuerbar. Information aller zur Verfügung stehenden Sensoren und Operationen werden über die *GetCapabilities*-Operation, detaillierte Angaben zu Steuerung und Verfügbarkeit eines Sensors über die Operationen *DescribeTasking* und *GetFeasibility* mit dem Nutzer ausgetauscht. Über die *Submit*-Operation werden konkrete Steuerungsanfragen vom Nutzer an den Dienst übermittelt und registriert. Ebenso wie der SAS kann der SPS im Zusammenspiel mit einem WNS eingesetzt werden, um Benachrichtigungen z.B. zu ausgeführten Steuerungsanfragen asynchron an den Nutzer zu übermitteln. Vom Sensor gesammelte Daten werden nicht vom SPS vorgehalten, mögliche Bezugspunkte (wie z.B. ein SOS) können stattdessen über Abfrage der Operation *DescribeResultAccess* in Erfahrung gebracht werden.

3.4.2. OGC SWE Formate

Tabelle 4: Übersicht der SWE-Formatspezifikationen (Stand 1. Quartal 2012)

Spezifikation	Beschreibung
Sensor Model Language (Version 1.0.1)	Datenformat zum Austausch von Metainformationen zu Sensoreigenschaften und internen Prozessen
Observations & Measurements (Version 1.0, O&M XML Encoding/ISO 19156)	Datenformat zum Austausch von Messdaten
SWE Common (Data Model) (Version 1.0.1)	Grundlage für alle SWE-Datenformate durch Festlegung gemeinsamer Typen und Parameter (erst ab SensorML Version 2.0 getrennt spezifiziert)

SWE Common

Das XML-basierte Format SWE Common Data Model (OGC, 2007c) wurde zusammen mit der Sensor Model Language in der Version 1.0.0 bzw. 1.0.1 innerhalb eines Standards spezifiziert. Es enthält grundlegende Komponenten zur Beschreibung von Sensordaten wie z.B. Datentypen, Parameter-, Mengen- und Zeitangaben, die ebenfalls in allen weiteren SWE-Spezifikationen zum Einsatz kommen.

Sensor Model Language

Die Sensor Model Language (SensorML) stellte Ende der 1990er Jahre den „Kondensationskern“ der SWE-Initiative dar (OGC, 2007c). Das XML-basierte Format bietet ein generisches Modell zur Beschreibung verschiedenster sensorbezogener Prozesse (siehe Abbildung 9). Im einfachsten Fall kann SensorML zur standardisierten Erfassung von spezifischen Sensoreigenschaften verwendet werden. Darüber hinaus ermöglicht das Format auch die Erfassung von Ablaufprozessen, wie z.B. Herausstellung des Ursprungs bzw. das detaillierte Zustandekommen von Messdaten aus Beobachtungen, sowie weiterführende Prozeduren, wie z.B. das Ableiten bzw. Umrechnen in höherstufige Informationsprodukte. Prozesse können dabei durch umfassende Beschreibung aller relevanten Größen und Parameter hinterlegt werden, so dass sie für Außenstehende interpretier- und gegebenenfalls ausführbar sind. Grundlegende wie auch weiterführende Vorgänge, wie z.B. die automatisierte Umsetzung von Prozessen durch eine ad hoc-Interpretation, können ohne vorherige Kenntnis der spezifischen Eigenschaften eines Sensorsystems durchgeführt werden. In SensorML hinterlegte Informationen wurden laut Spezifikation explizit für eine verbesserte Recherchier- und Vernetzbarkeit entwickelt. Neben einer verbesserten Bewertbarkeit der Datenherkunft können zusätzlich auch weiterführende SWE-Ressourcen wie z.B. Verweise auf einen SOS oder SPS referenziert sein.

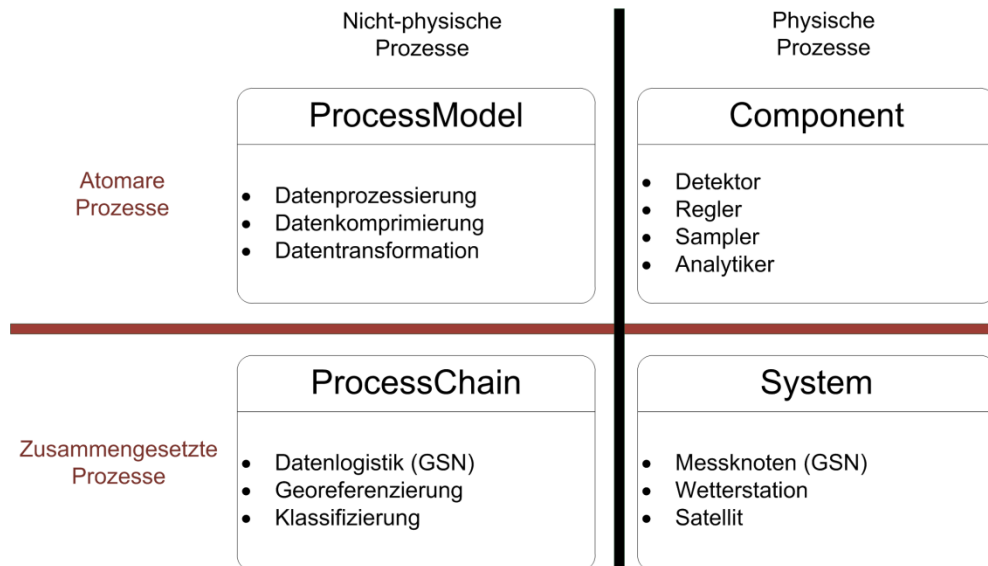


Abbildung 9: Übersicht der Prozessmodellierung in SensorML mit Beispielen (nach OGC, 2007c)

Observations and Measurements

Das Format Observations and Measurements (O&M) spezifiziert ein XML-basiertes Anwendungsschema des Standards Geography Markup Language (GML) zur Erfassung räumlicher Objekte (features, OGC, 2007d). Es bietet Modelle und Schemata zur Codierung von Sensorbeobachtungen und Ergebnissen sensorbezogener Prozesse. Zentraler Bestandteil des Modells ist der Typ Beobachtung (*observation*), der Resultate (*result*) von Beobachtungsphänomenen (*observed property*) zusammen mit referenzierenden Informationen zu deren Herkunft (*procedure*) und Eigenschaft mit räumlichen Objekten (feature of interest) verknüpft (siehe Abbildung 10). Das Format unterstützt zur Codierung der Resultatwerte verschiedenste Datentypen, wie z.B. ASCII, Binärblöcke oder Multimedia-Dateitypen (Multipurpose Internet Mail Extensions (MIME)) wie u.a. JPEG. O&M soll so den Austausch verschiedenster Arten von Sensordaten in einer standardisierten Art über technische und anwendungsspezifische Grenzen hinweg unterstützen. Es kann zudem durch Anwendungsprofile wie z.B. WaterML oder das Earth Observation Metadata Profile (Bacharach, 2007) an die spezifischen Bedürfnisse von Nutzergemeinden angepasst werden.

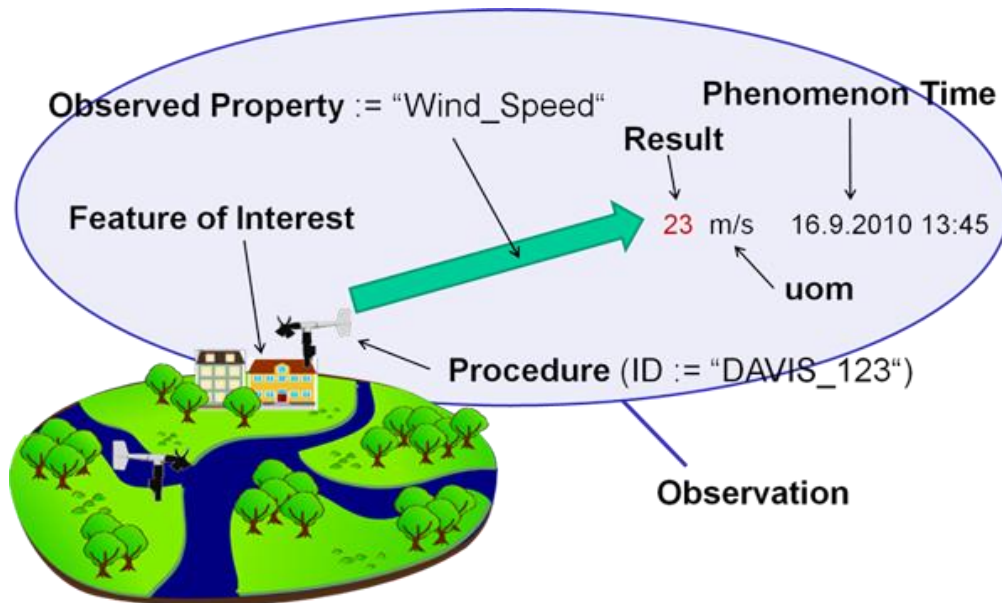


Abbildung 10: Beispiel der Modellierung einer Messbeobachtung (*observation*) in O&M (http://www.ogcnetwork.net/sos_2_0/tutorial/om)

3.4.3. Aktuelle Entwicklungen der OGC SWE-Initiative

Die Entwicklungen im Bereich SWE werden im Rahmen der Aktivitäten der Arbeitsgruppen des OGC kontinuierlich vorangetrieben (Bröring et al., 2011). Alle erarbeiteten Konzepte befinden sich deshalb unter permanenter Veränderung. Ergebnisse dieser Prozesse resultieren sowohl in überarbeiteten Versionen der Standardspezifikationen wie auch in der Hervorbringung neuer Modelle und Spezifikationen in Form von sog. *discussion papers* und *best practice specifications*. Die in dieser Arbeit beschriebenen Entwicklungen im Projekt SLEWS nehmen Bezug auf die entsprechenden Versionen der Format- und Dienstespezifikationen dieser Zeit (2007 bis 2010) und sind in den Tabellen 3 und 4 genauer benannt. Im Folgenden soll kurz auf seitdem erfolgte aktuelle Entwicklungen der zuvor beschriebenen Spezifikationen eingegangen werden.

Die in den Jahren 2006 und 2007 als Version 1.0 verabschiedeten SWE-Standards der Dienste SOS und SPS sowie der Formate SWE Common, SensorML und O&M befinden sich zur Zeit im Übergang zur Version 2.0 (Stand 1. Quartal 2012). Dieser Übergang dient vor allem der Präzisierung, Vereinfachung und der Vereinheitlichung der Standards untereinander. SWE Common 2.0 wurde zu diesen Zwecken ausgebaut und in einer neuen separaten Spezifikation zur Verfügung gestellt, das SWE Service Model wurde als einheitliches Basiskonzept zum Aufbau aller SWE-Dienste der Version 2.0 eingeführt. Die in der 1.0-Versionreihe ursprünglich als Alternative zu SensorML zur Beschreibung streaming-basierter Sensoren entwickelte Transducer Markup Language (TML) wurde aufgrund ausgebliebener Akzeptanz und Umsetzung eingestellt.

Die Spezifikationen für SAS und WNS wurden, u.a. wegen fehlender Harmonisierung mit anerkannten externen Standards (z.B. Web Services Notification, OASIS, 2006b), nie als endgültige Standards verabschiedet, kommen in laufenden Implementierungen jedoch vielfach zum Einsatz und gelten als Basis für aktuelle Konzepte einer ereignisbasierten Kommunikation in der 2.0-Versionsreihe. Hierzu zählt die Entwicklung eines leistungsfähigeren Sensor Event Service (SES, OGC, 2008a), in Kombination mit dem Format Event Pattern Markup Language (EML, beides z.Z. discussion paper), als mögliche Nachfolge für den SAS. Weiterhin wird die Einbeziehung von *publish/subscribe*-basierten Benachrichtigungsfunktionen direkt in den SPS (ab Version 2.0 umgesetzt) und den SOS diskutiert. Zusätzlich finden weitere Arbeiten für die Konzeption eines allgemeinen (nicht nur sensorbezogenen) OGC Event Service (OGC, 2011b) statt.

Da sich die Grundfunktionen der genannten Dienste und Formate kaum ändern und unter Umständen nur umpositioniert werden, sind die beim Übergang von SWE-Versionsreihe 1.0 auf 2.0 zu beachtenden Veränderungen für die Konzepte dieser Arbeit minimal. Eventuelle Einflüsse auf eine technische Umsetzung werden bei Bedarf in den thematisch zugehörigen Kapiteln einzeln diskutiert.

3.5. Erste Bewertung der OGC SWE-Technologie

Die Nutzung der in diesem Kapitel beschriebenen Konzepte und Technologien als Grundlage zur allgemein gültigen Vernetzung von umweltbezogenen Sensorquellen in ein Sensor Web lässt eine Reihe von Mehrwerten erkennen. Wesentliche Merkmale sind die Verwendung offener anerkannter Standards, die Auffindbarkeit und interoperable Verbindung verschiedenster verteilter Datenquellen über das Internet und die daraus resultierende Überbrückung verschiedener zuvor oft isolierter Anwendungsbereiche (z.B. vom drahtlosen Sensornetzwerk über autonome Drohnen bis zum Satellitensystem, siehe Bacharach, 2007). Über SWE umgesetzte Anwendungen, wie z.B. das hier beschriebene Frühwarnsystem, können durch den Gewinn an Flexibilität, wie er durch die Verwendungen von Web Services generell geboten wird, profitieren. Teilkomponenten des Systems können modular und unabhängig entwickelt werden, ohne die Interoperabilität zueinander zu verlieren. Veränderungen oder Erweiterungen von zugrunde liegenden Sensoren können ohne grundlegende Änderungen an der Systemarchitektur einbezogen werden. Die Umsetzung dieser Merkmale ist jedoch gleichzeitig mit der Umsetzung einer zusätzlichen abstrakten Systemebene zwischen Sensor- und Anwendungsseite verbunden, die je nach verwendungsspezifischer Sichtweise als Nachteil ausgelegt werden kann. Durch die z.T. sehr allgemein ausgelegten Spezifikationen der SWE-Initiative sind Implementationen für bereits funktionelle Systeme mit Mehraufwand verbunden. Im nächsten Teil der Arbeit soll auf diese Thematik am Beispiel des Projekts SLEWS genauer eingegangen werden.

4. Konzeption eines sensorbasierten Frühwarnsystems

4.1. Nutzeranforderungen: Von Sensormessungen zu Warnungen

Im Folgenden sollen die nutzerseitigen Vorgaben für die Umsetzung einer Architektur für ein Frühwarnsystem erläutert werden, die im Rahmen der Forschungsarbeiten des Projekts SLEWS identifiziert worden sind. Hierzu wurde die Anforderung an ein Informationssystem und insbesondere an die Schnittstelle zwischen technischer Infrastruktur und Endnutzern bzw. politischen Entscheidungsträgern vom Projektpartner BGR analysiert und bearbeitet.

4.1.1. Identifizierung von Endnutzern

Entgegen der Annahme zu Projektbeginn existieren keine typischen Endnutzer von Frühwarnsystemen für Hangrutschungen. Die Endnutzeranalyse (SLEWS, 2011) hat ergeben, dass es in Deutschland keine Institution gibt, die gesetzlich dazu verpflichtet ist, Daten über mögliche Risikogebiete für gravitative Naturgefahren zu erheben und Warnmeldungen im Zusammenhang mit Massenbewegungen zu verbreiten. Im Gegensatz dazu sind Hochwasser- oder Unwetterwarnungen in klar definierte Kommunikations- und Informationsstrukturen eingebettet. Darüber hinaus ergab die Analyse, dass es in Deutschland an einheitlichen Strategien und Managementkonzepten im Umgang mit Naturgefahren und den sich daraus ergebenden möglichen Risiken für Mensch und Infrastruktur fehlt. Bei der Naturgefahr gravitative Massenbewegung kommt erschwerend hinzu, dass diese nicht flächenhaft als Schadensereignis auftritt, sondern nur als lokal begrenzte Gefahr mit volkswirtschaftlich nicht nennenswerten Schäden wahrgenommen wird. Demzufolge wird auch nicht die Notwendigkeit gesehen, standardisierte Verfahren zum Erfassen von Schadensereignissen durch Massenbewegungen und zur Maßnahmenplanung einzuführen, wodurch es an einer bundesweiten Risikokarte fehlt. Demzufolge war es nicht möglich, Regionen mit einer überdurchschnittlichen Schadensanfälligkeit infolge von Massenbewegungen zu identifizieren.

Auch wenn keine Gemeinden oder Regionen identifiziert werden konnten, die in besonderem Maße anfällig für Schäden durch Massenbewegungen sind, so ist es doch offensichtlich, dass Verkehrswege in Landschaften mit ausgeprägtem Relief und bestimmten geologischen Bedingungen eine hohe Vulnerabilität gegenüber Massenbewegungen aufweisen. Als mögliche Endnutzer wurden in diesem Zusammenhang Straßen- und Autobahnmeistereien, die Deutsche Bahn und Wasser- und Schifffahrtsämter ermittelt. Zu den ermittelten Endnutzern wurde persönlich auf Konferenzen oder schriftlich Kontakt aufgenommen. Auch für den Workshop „Warn- und Risikomanagement bei Massenbewegungen“, der im Juni 2009 im Hause der BGR stattfand, wurden die genannten Institutionen eingeladen. Die Geologischen Dienste der Länder war die einzige Endnutzergruppe, die für die Thematik Interesse zeigte und

sich auch in der Rolle sieht, Gefahren durch Massenbewegungen zu analysieren und zu bewerten.

Mit dem Sächsischen Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie konnte ein wichtiger Partner für die Ermittlung von Anforderungen an Frühwarnsysteme gewonnen werden. Die Ingenieurgeologen des Sächsischen Landesamtes dokumentieren seit Jahrzehnten Georisiken in ihrem Bundesland und führen Messungen an verschiedenen Überwachungsobjekten durch. Mit ihrer Unterstützung wurde die Felsenbühne Rathen im Elbsandsteingebirge (Nationalpark Sächsische Schweiz) als Fallbeispiel für die nutzerzentrierte Aufbereitung von Informationen und Warnungen bei Felsstürzen gewählt (Abbildung 11). Für die bis dahin nur epochal durchgeführte Überwachung des Felsturms zeigte der Einsatz einer kontinuierlichen Erfassung eine vielversprechende Ergänzung.

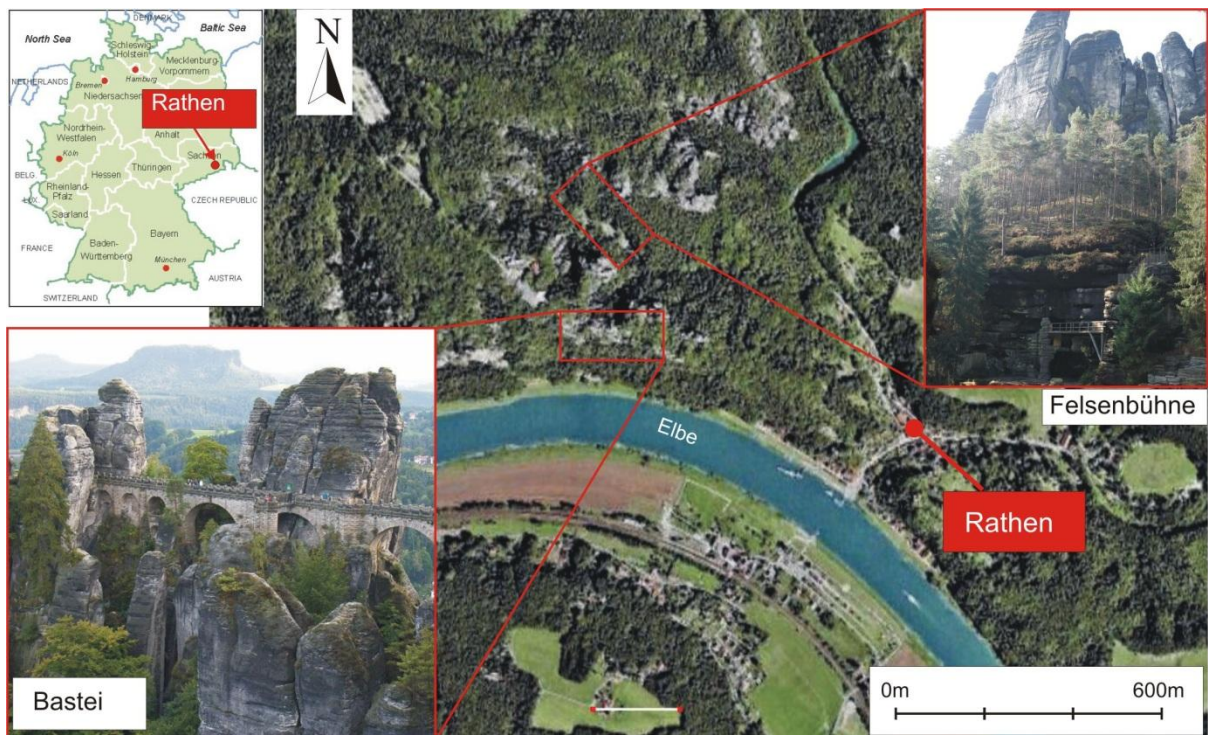


Abbildung 11: Einsatzort des SLEWS-Feldtests bei Rathen im Nationalpark Sächsische Schweiz (SLEWS, 2011)

4.1.2. Ermittlung der Anforderungen

Für die Ermittlung von Anforderungen an SLEWS wurde ein Online-Fragebogen entwickelt (SLEWS, 2011). Die Ergebnisse für den Bereich des Informationssystems lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Als Monitoringsystem soll SLEWS in erster Linie statistisch aufbereitete Daten anbieten können. Die Daten sollen ohne weitere Bearbeitung oder Transformation für den Nutzer direkt lesbar und leicht abrufbar sein, so dass hieraus schnellstmöglich entsprechende Informationen über Bewegungen und Veränderungen abgelesen werden können. Die Daten sollten nach Möglichkeit als X/Y-Diagramm dargestellt werden.

Die dafür zugrunde liegenden Ursprungsdaten sind ebenso von Interesse, jedoch für eine wesentlich kleinere Gruppe. Es werden hohe Qualitätsanforderungen an die Vertrauenswürdigkeit der Daten gestellt, die Einbeziehung von Plausibilitätskontrollen wird vorausgesetzt. Es hat sich gezeigt, dass zunächst die technische Umsetzung sowie der operative Nachweis der Funktionstüchtigkeit und der Genauigkeit des Sensornetzwerkes für die Endnutzer den höchsten Stellenwert hat und die eigentliche Einführungshürde darstellt. Der persönliche Kontakt zu ansprechbaren Verantwortlichen einer betreibenden Institution wurde ebenso als wichtiger Bestandteil einer Vertrauensbasis herausgestellt.

Darüber hinaus wäre es wünschenswert, wenn die Sensordaten mit Daten aus anderen Quellen kombiniert werden können. Insbesondere für die Bewegungsanalyse müssen in der Praxis noch andere Datenquellen (z.B. Klima- bzw. Wetterdaten, geologische Daten) herangezogen werden. Eine Verschneidung der verschiedenen Datenquellen sollte recht schnell und einfach möglich sein, um die Auswertungszeit so kurz wie möglich zu halten. Generell wünschen sich die Nutzer, dass das System möglichst kostengünstig, leicht installierbar und bedienbar sein soll. Die direkte Integration und Entwicklung und Implementierung von spezifischen Auswerteargorithmen wurde explizit nicht erwünscht. Hierbei ist es den Endnutzern wesentlich wichtiger, dass das System an bestehende oder individuell präferierte Dateninfrastrukturen und Auswerteargorithmen im Einzelfall angebunden werden kann, als aggregierte Informationen aus einer Hand zu bekommen.

Als Warnsystem und wichtige Funktion eines Frühwarnsystems sollte SLEWS jedoch in der Lage sein, zusätzlich zu den Messdaten Meldungen mit Beurteilung der Stabilität der Felswände übermitteln zu können. Wie eine Beurteilung konkret aussehen könnte wurde im Rahmen der Projektlaufzeit nicht ausreichend untersucht. Es wären abgestufte Warnmeldungen denkbar, die bei Überschreitung von vorab definierten Grenzwerten per Email oder SMS versendet werden. Dabei ist es wichtig, dass generierte Warnmeldungen Handlungsanweisungen und Information enthalten, mit welcher Wahrscheinlichkeit eine Gefährdung eintritt. Des Weiteren wird gewünscht, dass die Warnmeldung gleichzeitig darüber Auskunft gibt, wer noch die Warnung erhalten hat.

4.1.3. Anforderungsanalyse

Für den Aufbau einer ersten Systemskizze werden die aus der Anforderungsermittlung gewonnenen Kriterien zusammengefasst. Dieses kann in entsprechende Funktionsbereiche eines Informationssystems unterteilt werden. Diese Bereiche sind folgendermaßen definiert:

„Informationssysteme sind heute Allzweckwerkzeuge zum rechnergestützten Behandeln und Analysieren von Daten und Informationen. Demnach bezieht ein Informationssystem eine Kette von Schritten ein, beginnend mit der Modellierung, Beobach-

tung und Erfassung der Daten über deren Analyse und Nutzung für Entscheidungsprozesse bis hin zur Wiedergabe und Präsentation, die zusammen auf ein Vierkomponenten-Modell reduziert werden können: Erfassung, Verwaltung, Analyse und Präsentation - EVAP.“ (Bill, 2010, S.5-6)

Wie Abbildung 12 zeigt können die genannten Prozesse nicht ganzheitlich nur einem einzigen Funktionsbereich zugeordnet werden, sondern können sich auf verschiedene Bereiche des EVAP-Modells beziehen.

Allgemein:

- Niedrige technische Einstiegshürde beim Zugriff und einfache Handhabung im Umgang mit Informationssystemen
- Keine Vorauswertung, Aggregation oder Analyse von Daten durch das System selbst

Erfassung:

- Überwachung von Verschiebungen, Bewegungen oder Veränderungen von Felsspalten
- hinreichende Messgenauigkeit und -empfindlichkeit (Längenänderungen im Millimeterbereich, Neigungen unter 1°)

Verwaltung/Analyse:

- Bereitstellung/direkter Zugriff von Messdaten
- Anbindung an zusätzliche (verteilte) Datenquellen
- Anbindung an Anwendung(en) zur Plausibilitätsprüfung von Messdaten
- Anbindung an Anwendung(en) zur Bewertung von Hangprozessen

Präsentation:

- Statistische Aufbereitung und Visualisierung der Messdaten (z.B. in Diagrammform)
- Anforderung/Erhalt ereignisbasierter Nachrichten (z.B. per SMS/Email) mit qualifizierten Inhalten/Aussagen
- Einfache Einbindung alternativer (externer) Informationsprodukte

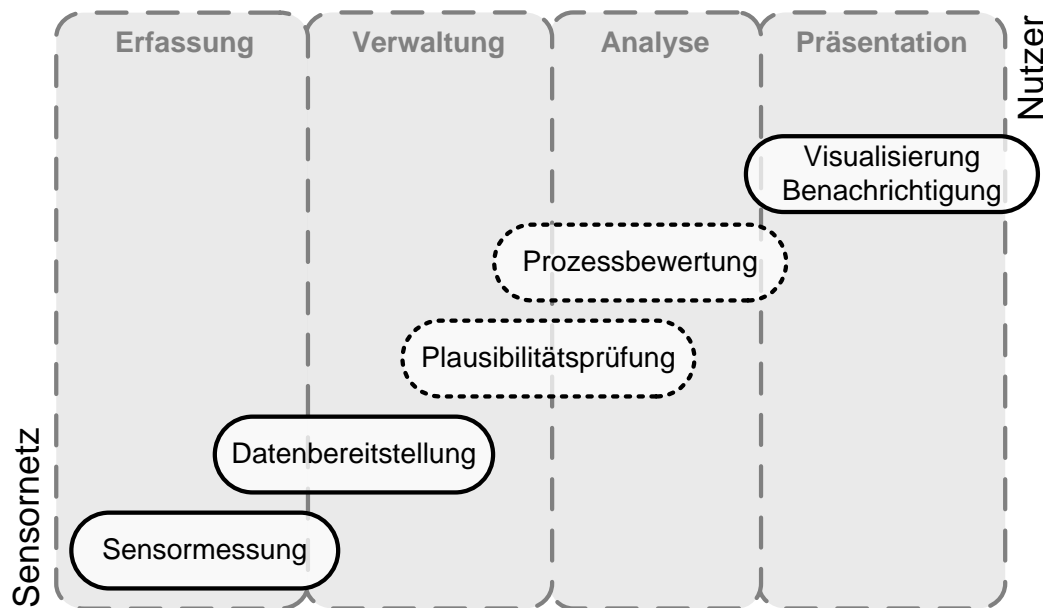


Abbildung 12: Formuliert Anforderungen abgebildet auf die Funktionsbereiche des EVAP-Modells

Es ist zu beachten, dass, wie in den Anforderungen erwähnt, im Rahmen dieser Arbeit keine spezifischen Modelle bzw. Umsetzungen einer Plausibilitätsprüfung bzw. Bewertung von Hangprozessen erarbeitet werden sollen. Die Durchführung solcher Methoden liegt im Anwendungsbereich spezialisierter Fachanwendungen, die je nach konkretem Anwendungsfall umgesetzt bzw. angebunden werden müssen. Der Fokus liegt vielmehr auf dem grundlegenden Aufbau solcher Systeme und der Verknüpfung ihrer Komponenten über standardisierte Systemschnittstellen.

4.2. Einbeziehung von Multisensor- und Datenfusion

Ein wesentlicher Aspekt beim Aufbau der Systemarchitektur liegt in der Berücksichtigung des zugrunde liegenden Sensornetzes. Zur Verbesserung der Datenqualität und der darauf basierenden Aussagen wurde im Projekt SLEWS gezielt auf die Strategie der Multisensor- und Datenfusion gesetzt (SLEWS, 2011). (Esteban et al., 2005, S. 2) definieren Datenfusion wie folgt:

“The integration of data, recorded from a multiple sensor system, together with knowledge, is known as data fusion.”

Hierbei können zahlreiche verschiedene aber auch gleiche Sensoren zum Bewertungsprozess herangezogen werden, um die Plausibilität einer Aussage zu überprüfen. Mit diesem Verfahren können z.B. Bewegungen erkannt und Messfehler aufgespürt werden. Für die Umsetzung dieser Aspekte in Systemprozesse existieren verschiedene Modelle. Das bekannteste, jedoch auf militärische Anwendungen ausgerichtete Modell ist das Joint Directors of Laboratories (JDL) Prozessmodell (Llinas & Hall, 1998), das den Ablauf der Datenfusion in verschiedene aufeinander aufbauenden

de Ebenen unterteilt. Daran angelehnt beschreiben (Harris et al., 1998) ein Wasserfallmodell (siehe Abbildung 13), das sich im Aufbau jedoch stärker an den hierarchischen Abläufen der Datenverarbeitung eines Informationssystems orientiert und, auf die Anwendung des Monitorings von Hangrutschungsprozessen übertragen, eine hilfreiche Vorlage liefert, um Prozessabläufe und ihre Abhängigkeiten für die aufzubauende Systemarchitektur zu konzipieren.

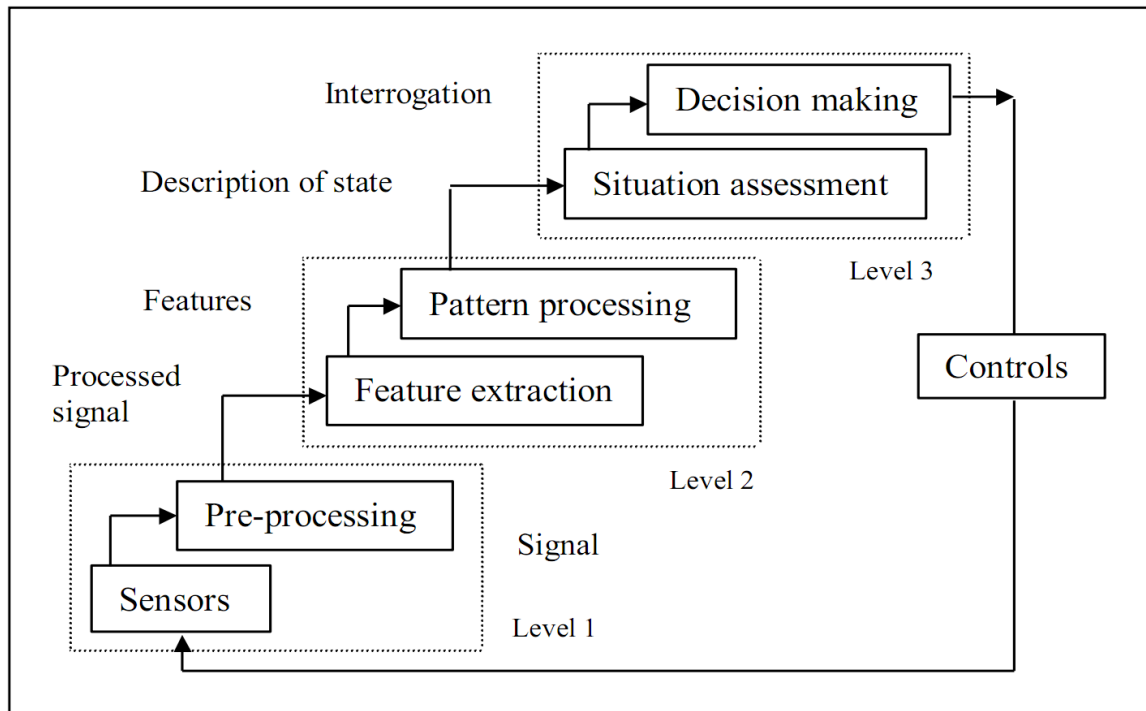


Abbildung 13: Wasserfallmodell der Datenfusion nach Harris et al., 1998 (Esteban et al., 2005, S.15)

Level 1 beinhaltet die Erfassung von Umweltbedingungen durch Sensorbeobachtungen und deren Umwandlung in eine Datengrundlage durch Vorprozessierung. Level 2 baut darauf auf und leitet durch die Kombination dieser Eingangsparameter (z.B. Neigung und Beschleunigung) Eigenschaften des zu beobachtenden Objekts (Bewegung des Untergrunds) ab. Abbildung 14 und Abbildung 15 zeigen dabei in Beispielen, wie durch die Kombination verschiedener Sensorsignale und menschlichen Vorwissens Bewegung detektiert und fehlerhafte Messungen erkannt werden könnten. Level 3 verwendet diese Bewertungen um aus ihren Eigenschaften auf Ereignisse schließen zu können. Im beschriebenen Fall können die gewonnenen Erkenntnisse über die Bewegung des Untergrunds verwendet werden, um z.B. über die Verwendung eines spezialisierten Prozessmodells auf die Stabilität des Hangs schließen zu können. Ergebnisse dieser Ebene stellen zudem die Schnittstelle zum Nutzer dar und liefern die benötigten Informationen, um Entscheidungen treffen und entsprechende Handlungsstrategien einleiten zu können. Weiterhin befindet sich Level 3 in einer Rückkopplung mit Level 1, wodurch die Prozesse der Datenerfassung zugunsten einer Optimierung der darüber liegenden Ebenen beeinflusst werden können.

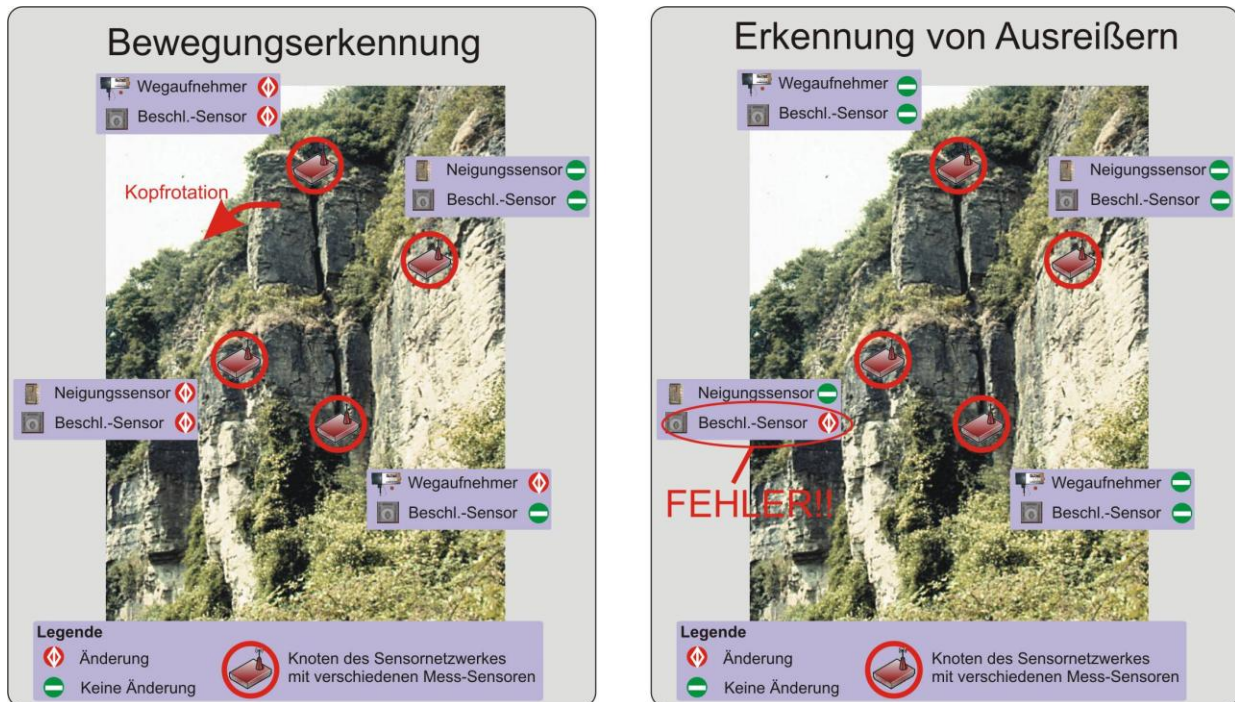


Abbildung 14: Plausibilitätsprüfung durch Sensor-/Datenfusion mithilfe verteilter Sensorknoten (SLEWS, 2011)

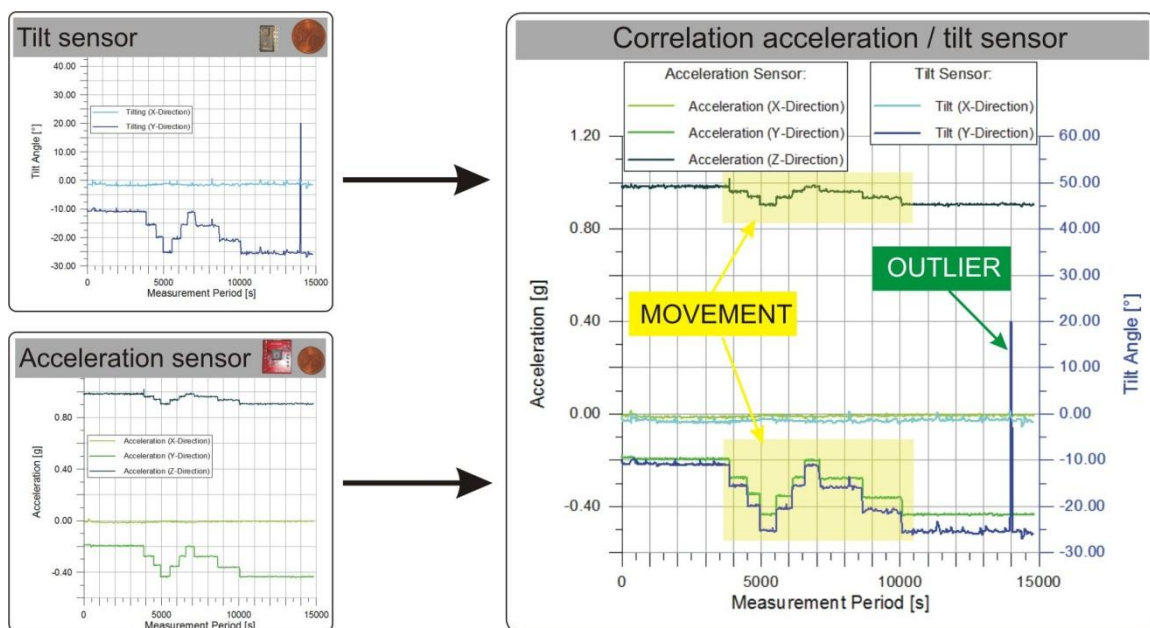


Abbildung 15: Plausibilitätsprüfung durch Sensor-/Datenfusion mithilfe verschiedener Detektoren eines Sensorknotens (SLEWS, 2011)

4.3. Einordnung in eine Frühwarnkette

Aus einem Frühwarnsystem generierte Informationen betreffen unterschiedliche Zielgruppen. Aus sozialwissenschaftlicher Sicht sind somit auch unterschiedliche soziale Systeme und entsprechende Reaktionen und Handlungen verknüpft. Für die technische Entwicklung eines Systems hat dies zur Folge, dass Schwerpunkte nicht alleine auf dem technischen Informationsprozess liegen dürfen, sondern auch Reaktionen

aller Zielgruppen mitberücksichtigt werden müssen. Deshalb ist es wichtig, dass ein Frühwarnsystem nicht isoliert, sondern als Teil eines Schutzkonzeptes gesehen werden muss. Wie auch die Anforderungsanalyse des Projekts SLEWS zeigt, deckt die Informationsinfrastruktur eines Frühwarnsystems den Bereich von der Datenerfassung über die Unterstützung der Entscheidungsfindung bis zur Schnittstelle der daraus resultierenden Kommunikationsprozesse ab (technischer Informationsprozess, siehe Abbildung 16). Besonders an dieser Schnittstelle unterscheiden sich Frühwarnsysteme maßgeblich voneinander, je nachdem ob sie für den Einsatz als Überwachungs-, Warn- oder Alarmsystem konzipiert sind. Obwohl eine Berücksichtigung nur geringe Veränderungen auf die zum Einsatz kommenden Technologien zur Folge hat, bedarf es der Profilbildung ihrer Funktionen zur Einpassung in den jeweiligen Verlauf einer Frühwarnkette. Im Fall der Anforderungsanalyse im Projekt SLEWS ergeben die Vorgaben ein teilautomatisiertes System, das vor allem auf Fachnutzer des Geologischen Dienstes als wichtige Stützpunkte in einer Frühwarnkette abzielt. Automatisierte Alarme und Handlungsaussagen an z.B. Einsatzkräfte und Betroffene sind ohne vorherige Konsultierung von Fachanwendern tendenziell nicht erwünscht. Kommunikationsprofile für eventuell auftretende gravierende Ereignisse, die ein sofortiges Handeln erforderlich machen, müssen zwar ebenso erarbeitet werden, bedürfen jedoch einer sehr sensiblen Abstimmung zwischen allen verantwortlichen Beteiligten.

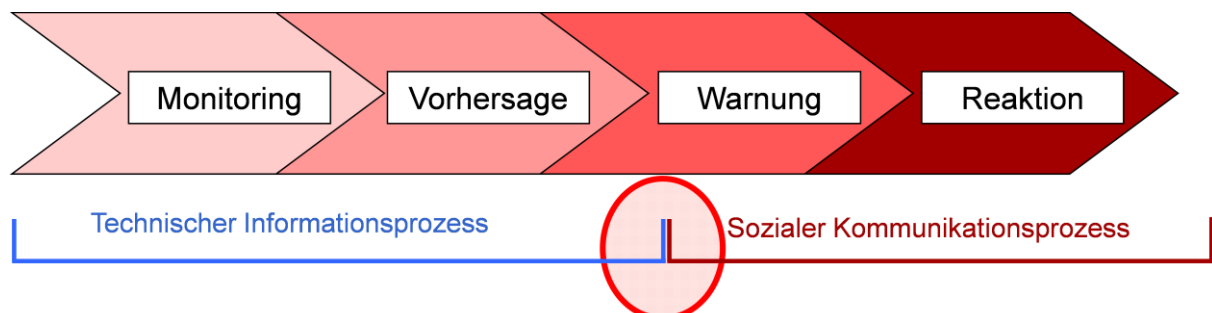


Abbildung 16: Übergang der Kommunikationskette eines Frühwarnsystems von der technischen in die soziale Informationsbereitstellung (SLEWS, 2011)

4.4. Technische Anforderungen: Von Rohdaten zu Informationsprodukten

Die in den zurückliegenden Kapiteln formulierten Anforderungen an die Informationsinfrastruktur des SLEWS-Frühwarnsystems erlauben eine erste technische Konzeption der zugrunde liegenden Geodateninfrastruktur. Maßgeblich für diese Architektur ist, Daten des spezialisierten drahtlosen Sensornetzes aufbereiten und zur Verfügung stellen zu können, um Vorgänge und Werkzeuge zur Interpretationsunterstützung und Entscheidungsfindung zeitgerecht mit benötigten Daten zu versorgen. Im Mittelpunkt steht dabei die Anbindung und Nutzung aller benötigten Komponenten über standardisierte Formate und Schnittstellen, um die lückenlose Bereitstellung von Daten und daraus gewonnenen Informationen über den gesamten abzudecken-

den Teil der Frühwarnkette zu gewährleisten. Hierdurch soll der Informationsfluss zwischen verantwortlichen Beteiligten, wie z.B. Fachnutzern, Einsatzkräften und sonstigen Betroffenen, optimiert und bei Bedarf auch zu externen Quellen, Systemen und Beteiligten erweitert werden.

Stärken der Technologien serviceorientierter Architekturen und Webservices können durch die Verwendung der OGC SWE-Standards ausgenutzt werden. Alle Bestandteile des Gesamtsystems können so aus grobgranularen Teilkomponenten bestehen, die unabhängig voneinander entwickelt, erweitert oder verändert werden können. Zugriff auf Daten und Informationsprodukte aller Verarbeitungsebenen können webbasiert erfolgen, wodurch Verfügbarkeit und Nachvollziehbarkeit der Daten drastisch erhöht werden. Dies stellt eine wesentliche Neuerung zu klassischen Frühwarnkonzepten dar, in denen der Grad an verfügbaren Datendetails meist mit dem steigenden Grad der Aussagequalität entlang der Kommunikationskette abnimmt. Im Rahmen des aufzubauenden webdienstebasierten Frühwarnsystems bleibt die Auswertung und Aggregation von Daten entlang dieser Kette natürlich weiterhin notwendig (Messdaten für Fachnutzer, Karten für Einsatzkräfte), was jedoch nicht mit dem Verlust an Datendetails einhergeht. Alle Ursprungsdaten sollen bei Bedarf zur Verfügung stehen, um die Erstellung der daraus erzeugten Informationsprodukte gegebenenfalls gegenprüfen, dokumentieren bzw. belegen zu können.

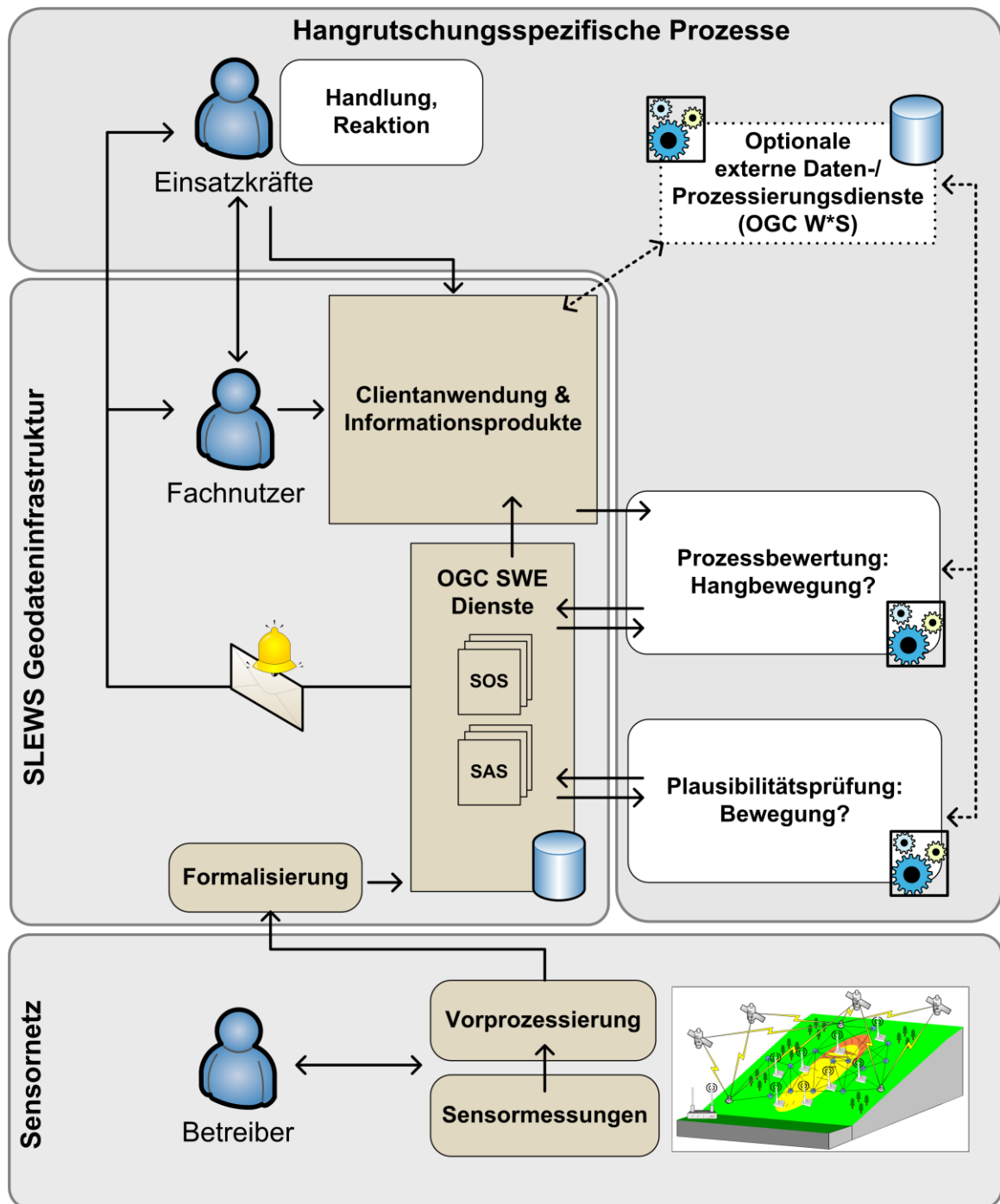


Abbildung 17: Systementwurf mit Funktionsbereichen des SLEWS-Frühwarnsystems (Bereiche „Sensornetz“ und „Geodateninfrastruktur“ = Funktionspflichtumfang)

4.4.1. Prozessmodellierung

Abbildung 17 zeigt einen ersten hochstufigen Entwurf aller beteiligten Prozesse und Schnittstellen in nichtsequentieller Anordnung. Die Modellierung orientiert sich dabei an der Flussrichtung der Daten zwischen den verschiedenen Funktionsbereichen im Frühwarnsystem. Hierbei werden drei Hauptbereiche angedacht:

Im Bereich **Sensornetz** werden Sensordaten von ihrem Ursprung (Sensormessung) zur Peripherie des Sensorsystems befördert. Die Sensorbeobachtungen aller beteiligten Sensorknoten werden über interne Organisation (Multi-Hop-Verfahren, siehe Kapitel 2.4.4) gesammelt und an die Datensenke (Gateway) des Sensorsystems weitergeleitet. Von dort werden sie über einen verbundenen Gatewayserver ausgelesen und vorprozessiert. Die Vorprozessierung umfasst die system- bzw. sensorspezifische Umwandlung und Überführung der Sensorbeobachtungen aus einem internen Format in menschenlesbare Messwerte. Ab diesem Punkt stehen die Messdaten für einen webbasierten Zugriff bereit und können in die Diensteebene der Geodateninfrastruktur überführt werden. Die Wartung und insbesondere Steuerung des Sensornetzes, bzw. im Fall des autonomen Systems vielmehr die Versetzung in verschiedene Betriebsmodi, wird in diesem Modell im Verantwortungsbereich des Systembetreibers gesehen. Ursprünglich wurde im Rahmen des Projekts SLEWS die bidirektionale Kommunikation bzw. webbasierte Steuerung über einen SPS von Nutzerseite angedacht, jedoch aufgrund des stark optimierten und energielimitierten Operationsumfelds des Sensornetzes vorerst wieder verworfen.

In einem nächsten Schritt werden die über den Gatewayserver verfügbaren Daten in die Diensteebene der **SLEWS Geodateninfrastruktur** eingebracht. Hierfür müssen sie SWE-bezogen syntaktisch und semantisch formalisiert werden, um anschließend über SOS- bzw. SAS-Diensteschnittstellen abrufbar zu sein. Ab diesem Punkt können die Daten standardisiert zur Weiterverarbeitung für Analyse- und Informationszwecke bereitgestellt werden (OGC SWE Dienste). Eine bzw. je nach Konzept auch mehrere SOS-Instanz(en) dienen sowohl als Quelle wie auch als Senke für die verschiedenen Verarbeitungsstufen der Daten im Laufe der fachspezifischen Prozessierung. Auf dieser Datenhaltung aufbauend stellt eine für den Fachnutzer konzipierte SWE-kompatible Clientanwendung die Grundlage für die Erstellung von Informationsprodukten, wie z.B. die karten- und diagrammbasierte Darstellung von Mess- bzw. Analysedaten, bereit. Fachnutzer können anschließend, basierend auf den vorliegenden Informationen, über die Kommunikation mit den Einsatzkräften Reaktionen und Handlungsstrategien abstimmen und einleiten. Je nach Bedarf können dazu verschiedene der Informationsprodukte an die Einsatzkräfte weitergeleitet werden. Grundlage für die ereignisbasierte Vermittlung von Meldungen an die Nutzer aber auch an die Fachanwendungen bilden eine bzw. je nach Konzeption mehrere SAS-Instanzen. Details über Aufbau und Orchestrierung der Diensteebene wird in den folgenden Kapiteln näher erläutert.

Der Bereich **hangrutschungsspezifische Prozesse** umfasst die an das Szenario angepassten Anwendungsprozesse des Frühwarnsystems. Die nach Vorlage der Anforderungsanalyse und des Datenfusionsmodells (Kapitel 4.1 und 4.2) aufeinander aufbauenden Fachanwendungen „Plausibilitätsprüfung“ (Bewegung?) und „Prozessbewertung“ (Hangbewegung?) sind modular über SWE-basierte Schnittstellen an die Geodateninfrastruktur angegliedert und beziehen bzw. liefern Daten über SOS-Schnittstellen. Ebenso ist eine Anbindung an die SAS-Schnittstellen vorgesehen, um Quelldaten nicht permanent anfordern zu müssen, sondern eine Abfrage erst nach

Erhalt einer Meldung ereignisbasiert initiieren zu können. Angelehnt an das Wasserfallmodell (Kapitel 4.2) findet dazu eine Rückkopplung zwischen den Auswertungsprozessen und ihrer Datengrundlage statt, um die nicht permanent fixen Schwellwerte für die Auslösung von Benachrichtigungen dynamisch anpassen zu können.

Als mögliche Erweiterung der bisher genannten Kernfunktionen des Frühwarnsystems demonstriert der Bereich **optionale externe Daten-/ Prozessierungsdienste** die Möglichkeit, weitere Ressourcen über OGC-basierte Diensteschnittstellen (W*S) einzubeziehen. Raster-, Vektor- sowie Sensordaten externer Anbieter können die Anreicherung der Informationsprodukte unterstützen. Gleiches gilt für die Einbeziehung externer Prozessierungsanwendungen wie z.B. alternativer Hangprozessbewertungen über einen Web Processing Service (WPS). Weiterhin können von einem Fachnutzer erstellte Informationsprodukte, wie z.B. Karten zur Hangstabilität, wiederum über OGC-basierte Schnittstellen angeboten werden, um sie sowohl für interne als auch externe Nutzer verbessert zur Verfügung stellen zu können.

5. Nahtstelle zur Geodateninfrastruktur: Datenbereitstellung

Im folgenden Kapitel wird gezeigt, wie Messdaten des Sensorsystems zugreifbar gemacht und in die SWE-basierte Geodateninfrastruktur bzw. Datenhaltung eines SOS überführt werden können. Der Aufteilung des EVAP-Modells eines Informationssystems folgend, werden dabei die Bereiche Erfassung und Verarbeitung behandelt. Angelehnt an die Funktionsbereichsübersicht in Abbildung 17 illustriert Abbildung 18 die Abfolge von nötigen Teilschritten, die diskutiert werden sollen.

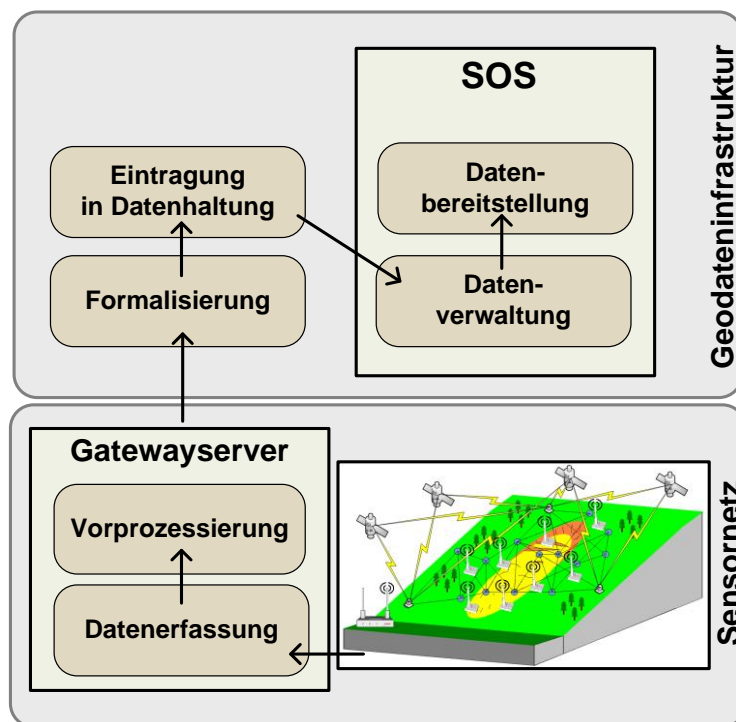


Abbildung 18: Technischer Ablauf der Datenbereitstellung über die GDI

5.1. Datenerfassung

5.1.1. Konfiguration des Sensornetzes

Die Grundlage der Datenerfassung ist die Ausbringung und der Betrieb des Scatter-Web-Sensornetzes. Während der spätere Zugriff auf die Daten von nicht spezifisch ausgebildeten Endnutzern erfolgen kann, muss die Ausbringung, Erstinstallation und Wartung des Sensornetzes von Spezialisten wie z.B. Ingenieurgeologen durchgeführt werden. Die wichtigste Durchführung nach der physischen Installation besteht in der „Scharfstellung“ bzw. Konfiguration der einzelnen Sensorknoten und des Sensornetzes als Ganzes. Dies umfasst die Ausrichtung und Anpassung der Sensorik an die Umwelt und die Optimierung des Mess- und Kommunikationsvorgangs, um den optimalen Kompromiss aus Überwachungsgenauigkeit und Energielimitierung zu finden (duty cycling).

Hierzu zählt u.a. die Anpassung eines Messtoleranzfilters durch Festlegung eines internen Schwellwerts, die Adjustierung von Mess- und Übertragungsintervallen sowie die konditionalen Abhängigkeiten der Sensoren und Sensorknoten untereinander. Hierbei kann der Sensorknoten z.B. angewiesen werden, Messwerte eines Sensors unterhalb eines gewissen Schwellwertes zu verwerfen, um Energieaufwand für unnötige Kommunikationsvorgänge zu vermeiden. Weiterhin können Sensoren in einen energieeffizienten Schlafmodus versetzt werden, den sie erst auf Veranlassung eines anderen Sensors des Sensorknotens verlassen. Bei den betrachteten Konfigurationen im Projekt SLEWS handelt es sich hierbei zumeist um den Beschleunigungssensor, der bei Überschreitung einer Toleranzschwelle Messungen von z.B. Neigungs- und Drucksensor auslösen kann. Dieser Methodik folgend können auch benachbarte Sensorknoten durch den Empfang von Datenpaketen zur Durchführung von Messungen veranlasst werden. Ziel der Konfiguration ist es, Toleranzen so niedrig wie nötig und so hoch wie möglich anzusetzen, um unnötige Mess- und Kommunikationsvorgänge zugunsten des Energieverbrauchs zu vermeiden. Entsprechende Parameter können zu einem späteren Zeitpunkt im Laufe des Betriebs über Fernwartung angepasst werden.

5.1.2. Vorprozessierung und Bereitstellung der Messdaten

Der Gatewayserver stellt die Schnittstelle zwischen Sensornetz und externen Anwendungen dar und steht mit der Datensenke (Gateway) kabelgebunden oder drahtlos per TCP/IP-Netzwerk (z.B. über UMTS/GSM) in Kontakt. Die darauf umgesetzte Controller-Ebene abstrahiert den Zugriff auf das Sensornetzwerk und führt Funktionen zur Verarbeitung und Verteilung von Messdaten aus, die nicht im energielimitierten Umfeld des Sensornetzes durchgeführt werden können. Die speziell an das Sensornetz angepasste Serveranwendung wurde auf Linux-Basis in der Programmiersprache C umgesetzt und besteht aus verschiedenen Modulen (Abbildung 19). Das zentrale Controller-Modul identifiziert eingehende und ausgehende Datenströme (Steuerbefehle und Messdaten) der Kommunikationsmodule und vermittelt sie an die entsprechenden Parser-Module weiter. Regeln zur Verarbeitung von Kommandos und Messdaten müssen dabei eng mit Kommandos und der Messdatensyntax des Sensornetzwerks abgestimmt sein. Nach der Zusammensetzung und Aufbereitung der eingehenden Datenpakete stehen Messdaten erstmals zur Abfrage über das TCP/IP Server-Modul bereit. Listing 1 zeigt die Form der Ausgabe anhand eines Auszugs bestehend aus vier Messdatenpaketen.

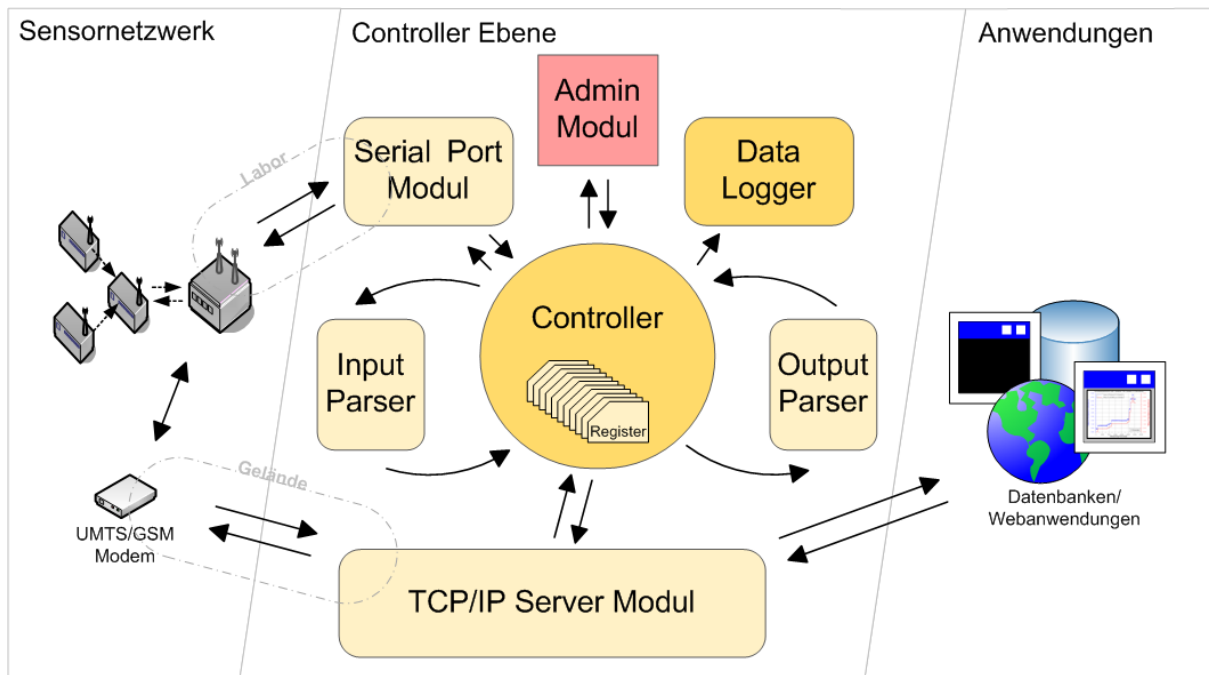


Abbildung 19: Controller-Modul auf dem Gatewayserver zur Datenvermittlung zwischen Sensornetz und externen Anwendungen (SLEWS, 2011)

```
1009|2011-09-13#17:13:10|ACC|F280|FAE8|DCD8|2000
1009|2011-09-13#17:13:20|ACC|F2A8|FB18|DC78|2000
1008|2011-09-13#19:39:16|INCL|02A0|7C40|177
1008|2011-09-13#19:39:46|INCL|02A0|7C40|178
```

Listing 1: Rohdaten des Sensornetzes vom Gateway

Die einzelnen Messdatenpakete sind durch einen Zeilenumbruch voneinander getrennt. Ein Messdatenpaket besteht aus mehreren Segmenten, die durch Trennzeichen (|) separiert sind. Die Segmente enthalten Informationen zur Sensorknotenidentifikation (Segment 1), Zeitstempel der Messung (Segment 2), Sensoridentifikation (Segment 3) sowie sensorspezifische Wertetupel auf Hexadezimalbasis (ab Segment 4). Die Tupel im gezeigten Beispiel unterscheiden sich anhand der erfassten räumlichen Dimensionen, wobei der Neigungssensor (INCL) zwei (X-, Y-Achse) und der Beschleunigungssensor (ACC) drei Dimensionen (X-, Y-, Z-Achse) wiedergibt. Im Fall der in Kapitel 2 beschriebenen Sensoren wird zudem an letzter Stelle ein Temperaturwert zur funktionalen Überwachung der internen Sensorplatine mitgeführt.

In einem nächsten Schritt können die Hexadezimalsegmente der Messdatenpakete innerhalb des TCP/IP Server-Moduls interpretiert, kalibriert und in menschenlesbare Werte umgewandelt werden. Listing 2 zeigt eine spezialisierte Funktion (implementiert in der Programmiersprache C) zur Umwandlung der Messdaten des Neigungssensors. Diese muss eng mit den herstellerspezifischen Vorgaben und Parametern und dem Kommunikationsformat des ScatterWeb-Sensornetzes abgestimmt sein.

```
void calc_inclination(char *sensorvalue, char *sresult)
{
    [...]
    buffer = strtol(sensorvalue, 0, 16);
    buffer = buffer >> 5;
    result = (buffer-1024.0)/1638.0;
    result = asin( result ) * 180.0 / PI;
    [...]
}
```

Listing 2: Funktion zur Umwandlung/Kalibrierung von Hangneigungswerten von Hexadezimal- zu Zahlenwerten der Einheit Grad (°)

Im Projektverlauf gesammelten Erfahrungen zufolge erweist sich die Vorprozessierung als robust gegenüber Ausreißern, die durch Übertragungsfehler bedingt sind. Fehlerhafte Datenpakete, die beispielsweise durch Spannungsschwankungen oder Funkfehler entstehen, führen bei ihrer Verarbeitung zu ungültigen Ergebnissen und werden verworfen. Die Wahrscheinlichkeit, valide Werte bei der Verarbeitung fehlerhafter Datenpakete zu erhalten, wurde nach Beobachtungen als sehr gering eingestuft. Alternative Validierungsmethoden, wie z.B. die gängige Methode der Errechnung und Übermittlung von Prüfsummen, sind von Seiten des Herstellers nicht vorgesehen.

5.2. Formalisierung

Die Formalisierung der Messdatenpakete bildet die Basis für die Nutzbarmachung der Messdaten durch die Umwandlung in multiple Austauschformate. Das TCP/IP Server-Modul stellt die vorprozessierten Daten über das Internet zur Verfügung und kann über entsprechende Client-Anwendungen abgefragt werden. Clients können sowohl lokal auf dem gleichen, als auch auf entfernten Servern zum Einsatz kommen. Im Laufe des Projekts wurden verschiedene modulare Client-Anwendungen erstellt, die je nach Anwendungszweck unterschiedliche Aufgaben erfüllen. Zusammenfassend bestehen diese darin, Rohdaten entgegenzunehmen und für ihre jeweilige Weiterverarbeitung umzuwandeln. Hierzu zählt beispielsweise die Überführung in einen Webserver, um die Daten auf einer HTML-basierten Webseite visualisieren zu können (siehe <http://www.slews.de/monitoring/index.html>), oder die Übertragung in ein Datenbanksystem, wie z.B. MySQL, für die nachhaltige Speicherung und zur weiteren Verarbeitung. Einer der wichtigsten Schritte im Aufbau des Gesamtsystems bestand in der Konzeption der Schnittstelle zwischen Sensorsystem und Geodateninfrastruktur bzw. der Methodik der Übertragung der Rohdaten in die SWE-basierte Datenhaltung. Über die zuvor genannten Funktionen hinaus ist die Aufgabe dieser speziellen Client-Anwendung, neben der inhaltlich syntaktischen Umformung, auch eine kontextabhängige semantische Erweiterung der Rohdaten vorzunehmen. Im Folgenden soll der Vorgang dieser Formalisierung näher erläutert werden. Auszüge des Quellcodes zur Implementierung einer SWE Client-Anwendung sind in Listing 1 im Anhang zu finden. Unterschiedliche Methoden des Eintragsprozesses in die Datenhaltung der Geodateninfrastruktur sind in Kapitel 5.3 näher beschrieben.

5.2.1. SWE-basierte Modellierung der Messdaten

Neben der Codierung relevanter Beschreibungen des Sensornetzes in SensorML (siehe Kapitel 5.4.3), ist vor allem die Anreicherung der Rohdatenpakete mit einem semantisch eindeutigen Kontext von Bedeutung, um die enthaltenen Informationen SWE-basiert nutzbar machen zu können. Zentrales Konstrukt stellt dabei die Beobachtung bzw. *observation* dar, welche konform zum SWE-Standard Observations and Measurements (O&M) codiert ist. Eine *observation* umfasst semantisch auflösbare Angaben über den Datenproduzenten (*procedure*) einer Beobachtung, dessen aufgezeichneter Wert (*result*) stellvertretend für ein Phänomen (*observed property*) an einem bestimmten räumlichen Objekt (*feature of interest*) zu einem bestimmten Zeitpunkt (*phenomenon time*) steht (siehe Abbildung 10). Um die verwechslungsfreie Verwendung dieser Angaben gewährleisten zu können, kommen unter anderem eindeutige Identifikatoren zum Einsatz. Der zugrunde liegenden XML-Syntax entsprechend, werden diese in Form von Attributen der jeweiligen XML-Elemente geführt. Dies geschieht durch die Verwendung einer speziellen Zeichenkette, einem sogenannten Uniform Resource Identifier (URI). Unterformen des URI stellen der Uniform Resource Locator (URL) und der Uniform Resource Name (URN) dar. Die Verwendung von URIs wird in Kapitel 5.5 diskutiert.

Die beschriebenen Messdaten des SLEWS-Sensornetzes enthalten, neben Messwert und Messzeitpunkt, lediglich Kurzreferenzen zu Sensor- und Sensorknotenidentifikation (z.B. 1009 und ACC). Um diese Vorgaben zu einer SWE *observation* vervollständigen zu können, müssen, neben der Übernahme von Messzeitpunkt und Messwert, Parameter ergänzt werden, die nicht explizit aus der Ursprungsausgabe hervorgehen. Die Kombination von Sensor- und Knotenidentifikation liefert die wichtigste Referenz, um welchen Datenproduzenten und um welches entsprechende beobachtete Phänomen es sich handelt. Hierzu muss auf das entsprechende Vorwissen des Konstrukteurs bzw. Sensornetzbetreibers (in SLEWS die Projektpartner SWB und LIH) zurückgegriffen werden. Gleiches gilt für die Positionierung der Sensorknoten im Raum. Da die Knoten aus Gründen der Energieoptimierung nicht über Mittel der eigenständigen Positionierung verfügen (z.B. via Global Navigation Satellite System), müssen Standortkoordinaten entweder zum Zeitpunkt der Ausbringung oder bei späteren Begehungen im Feld gesammelt oder im Nachhinein aufwändig über Analyse der Kommunikationssignale berechnet werden (Walter & Born, 2008).

Tabelle 5: Beispiel für die Erweiterung und Zuordnung von Identifikatoren des Messdatenpakets 1008|2011-09-13#17:13:10|INCL|-4.905|-5.735 [...]

Paketsegment	Referenzierte Parameter
Knoten: 1008	urn:ogc:object:feature:Sensor:SLEWS:slewsMote_004 Position: 50.776208,6.080085 ID: aachen004 Beschreibung: Messpunkt 4, Aachen
Sensor: INCL	urn:ogc:def:phenomenon:SLEWS:2010:2Dinclination urn:ogc:def:phenomenon:EDCS:2005:plane_angle Maßeinheit: deg

Jedes Paket muss deshalb zur Laufzeit geparkt, analysiert und unter der Verwendung von Referenztabellen umgewandelt bzw. erweitert werden (siehe Tabelle 5). Listing 3 zeigt in Auszügen eine von verschiedenen möglichen Codierungsvarianten des Messdatenpakets 1008|2011-09-13#17:13:10|INCL|-4.23|-5.85[...] als O&M *observation*. Der üblicherweise zusätzlich als letztes Datensegment mitgeführte Kontrollwert der internen Platinentemperatur wird dabei nicht berücksichtigt.

```
<om:OM_Observation>
[...]
  <om:phenomenonTime>
    <gml:TimeInstant>
      <gml:timePosition>2011-09-13#17:13:10</gml:timePosition>
    </gml:TimeInstant>
  </om:phenomenonTime>
  <om:procedure xlink:href="urn:ogc:object:feature:Sensor:SLEWS:slewsMote_004"/>
  <om:observedProperty xlink:href="urn:ogc:def:phenomenon:SLEWS:2010:2Dinclination"/>
  <om:featureOfInterest>
    [...]
    <gml:Point gml:id="aachen004">
      <gml:pos srsName="urn:ogc:def:crs:EPSG:4326">
        50.776208,6.080085
      </gml:pos>
    </gml:Point>
    [...]
  </om:featureOfInterest>
  <om:result>
    [...]
    <swe:DataRecord>
      <swe:field name="Inclination_X">
        <swe:Quantity definition=
          "urn:ogc:def:phenomenon:EDCS:2005:plane_angle">
          <swe:uom xlink:href="deg"/>
          <swe:value>-4.905</swe:value>
        </swe:Quantity>
      </swe:field>
      <swe:field name="Inclination_Y">
        <swe:Quantity definition=
          "urn:ogc:def:phenomenon:EDCS:2005:plane_angle">
          <swe:uom xlink:href="deg"/>
          <swe:value>-5.735</swe:value>
        </swe:Quantity>
      </swe:field>
    </swe:DataRecord>
    [...]
  </om:result>
</om:OM_Observation>
```

Listing 3: O&M observation mit komplexer Codierung des Beobachtungsphänomens
urn:ogc:def:phenomenon:SLEWS:2010:2Dinclination

Es ist vor allem zu beachten, dass es sich beim Aufbau der Messdatenpakete der Neigungs- und Beschleunigungssensoren um komplexe Beobachtungen handelt. Diese bestehen, im Gegensatz zu den einfachen Beobachtungen der Drucksensoren und Seilzugwegaufnehmer, aus Angaben verschiedener Phänomene bzw. desselben Phänomens in verschiedenen räumlichen Dimensionen (hier Neigungswinkel der Achsen X und Y). Dieser Umstand muss für die spätere Datenverwaltung und -bereitstellung der Geodateninfrastruktur bzw. des SOS berücksichtigt werden. Hierbei entscheiden sowohl semantische wie auch organisatorische Aspekte, in welcher Form die Messdatenpakete umgewandelt und übertragen werden müssen. Die Art der Umwandlung kann an dieser Stelle auf zwei verschiedenen Wegen

durchgeführt werden. Bei der Behandlung als einzelne komplexe Beobachtung (siehe Listing 3) wird zur Identifizierung der beobachteten Eigenschaft das Attribut des Elements *observedProperty* auf den konstruierten und sensorspezifischen Identifikator `urn:ogc:def:phenomenon:SLEWS:2010:2Dinclination` gesetzt. Alternativ dazu kann eine Aufspaltung in zwei einfache Beobachtungen vorgenommen werden (siehe Listing 4). Hierbei wird das Attribut des Elements *observedProperty* jeweils auf den universelleren Identifikator `urn:ogc:def:phenomenon:EDCS:2005:plane_angle` gesetzt.

```
<!--##### Observation 1 ##### -->
<om:OM_Observation>
[...]
  <om:phenomenonTime>
    <gml:TimeInstant>
      <gml:timePosition>2011-09-13#17:13:10</gml:timePosition>
    </gml:TimeInstant>
  </om:phenomenonTime>
  <om:procedure xlink:href="urn:ogc:object:feature:Sensor:SLEWS:slewsMote_004"/>
  <om:observedProperty xlink:href="urn:ogc:def:phenomenon:EDCS:2005:plane_angle"/>
  <om:featureOfInterest>
    [...]
    <gml:Point gml:id="aachen004">
      <gml:pos srsName="urn:ogc:def:crs:EPSG:4326">
        50.776208,6.080085
      </gml:pos>
    </gml:Point>
    [...]
  </om:featureOfInterest>
  <om:result xsi:type="gml:MeasureType" uom="deg">
    -4.905
  </om:result>
[...]
```

```
</om:OM_Observation>

<!--##### Observation 2 ##### -->
<om:OM_Observation>
[...]
```

```
  <om:result xsi:type="gml:MeasureType" uom="deg">
    -5.735
  </om:result>
[...]
```

```
</om:OM_Observation>
```

Listing 4: O&M observations mit zwei einfachen Codierungen des Beobachtungsphänomens
`urn:ogc:def:phenomenon:EDCS:2005:plane_angle`

In den Kapiteln 5.4.2 und 5.5 wird die Modellierung der Messbeobachtungen zusammen mit ihrer Auswirkung auf syntaktische und semantische Interoperabilität näher diskutiert.

5.3. Eintragung in die Datenhaltung

Die bisherigen Ausführungen beschreiben grundsätzliche Überlegungen und Hürden, die bei der Anpassung des sensorspezifischen an das SWE-basierte Datenmodell bedacht werden müssen. Ein zurzeit noch ungelöstes Problem der SWE-Initiative stellt jedoch die Frage dar, wie und an welcher Stelle zwischen Sensor- und Dienstebene der eigentliche Vorgang der Anpassung und Übertragung vonstatten gehen

sollte. Während die SWE-Spezifikationsreihe vor allem darauf abzielt, eine „Plug&Play“-Fähigkeit zwischen Dienste- und Anwendungs-/Nutzerebene herzustellen, ergibt sich zwischen Sensor- und Diensteebene eine „Interoperabilitätslücke“ (Walter & Nash, 2009). Verschiedene Sensorsysteme mit entsprechend vielen spezifischen Protokollen müssen individuell über die Entwicklung von Adaptern an die SWE-basierte Diensteebene angepasst werden. Dieser Aufwand lässt entsprechende Implementationskosten beträchtlich steigen, da ausführliches Wissen sowohl von der Sensor- wie auch der SWE-Diensteebene vorausgesetzt sind. Eine ad-hoc-Vernetzung sollte jedoch nicht nur auf der Anwendungsebene, sondern vor allem auch auf der Sensorebene umsetzbar sein, um eine automatisierte Einbeziehung neuer Sensorsysteme in zeitkritische Anwendungen wie z.B. der Frühwarnung zu ermöglichen. Grundsätzlich kann die Integration von Seiten der Sensor- wie auch von Seiten der Diensteebene konzipiert werden. Zur Verdeutlichung wurden die beiden folgenden Systemmodelle entwickelt.

5.3.1. Sensorseitige Formalisierung

Das Prinzip der sensorseitigen Formalisierung legt die Modellierung und Durchführung der Formalisierungslogik auf die Seite des Sensorsystems bzw. des Systembetreibers (Abbildung 20). Allgemein betrachtet würde eine Umsetzung auf Hardwareebene unbestreitbare Vorteile bei der Verwirklichung von „Plug&Play“-Fähigkeit gewährleisten. So implementieren aktuelle Sensorsysteme wie z.B. Wetterstationen oder Überwachungskameras eigenständige Webserver (z.B. Crossbow, 2012) oder Nachrichtenprotokolle wie Twitter (z.B. UC Technology, 2012) für einen HTTP-basierten Austausch von Daten. Tiefergehende Bemühungen zur standardisierten Verbindung von Messwertgebern an die Netzwerkebene werden im Rahmen der IEEE 1451-Standardfamilie erarbeitet (NIST, 2011). Aufgrund des fachlichen Gewichts und breiter Unterstützung von Seiten der Hardwarehersteller weist die Initiative ein großes Potential auf und wird zudem in enger Zusammenarbeit mit dem OGC vorangetrieben. Grundsätzlich erscheint somit die hardwarenahe Formalisierung und Umwandlung von SWE-modellierten Daten als plausible Herangehensweise (Winkemann & Blankenbach, 2011). Auch im Rahmen des SLEWS-Projekts könnten Rohdaten des Sensorsystems theoretisch auf dem Gatewayserver oder selbst auf dem Gateway in O&M *observations* umgewandelt werden und unter Umständen sogar eigenständig an die Diensteebene übermittelt werden. Analog zu den oben genannten Beispielen wäre es generell sogar denkbar, einen SOS direkt in Hardwarenähe zu implementieren.

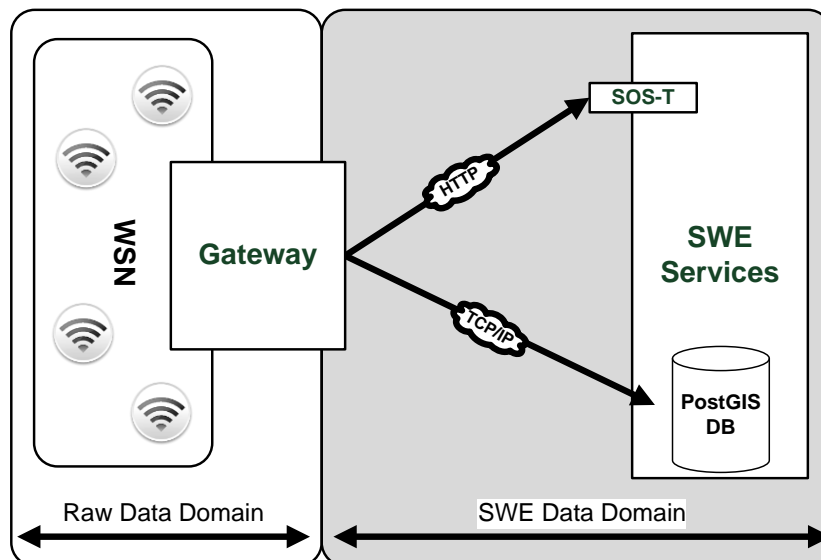


Abbildung 20: Prinzip der sensorseitigen Formalisierung von Rohdaten zum Eintrag in eine SWE-basierte Diensteebene (WSN = Wireless Sensor Network)

Im Gegensatz dazu liegt jedoch ein großer Schwachpunkt in der engen Verzahnung von Hardware- und Anwendungsebene, die dem bewusst gewählten Ansatz der Entkopplung von Sensorsystem und Sensorinformation der SWE-Initiative widerspricht. Dieser ist vor allem in der hohen Anzahl an derzeit verwendeten Sensorsystemen und –protokollen zu sehen. Entgegen eines verbreiteten Missverständnisses, wurde die Anwendung der SWE-Standards nie als Ersatz oder Erweiterung für diese Protokolle, sondern vielmehr zu deren Kapselung und Abstrahierung auf einer höheren Anwendungsebene konzipiert. Formalisierungsvorgänge müssten auch weiterhin spezifisch für jedes Szenario entwickelt und implementiert werden. Zudem existiert eine Vielzahl von hochspezialisierten Sensorsystemen, deren Konzeption kaum mit einer SWE-basierten Formalisierung zu vereinbaren ist. Hierzu zählen Systeme, wie z.B. das drahtlose Sensornetzwerk des SLEWS-Projekts, die auf ressourcenlimitierte Anwendungsfälle optimiert sind. Obwohl das Gateway, durch den Einsatz von z.B. Solarpanels oder Brennstoffzellen, und der Gatewayserver, durch Anschluss an eine permanente Stromversorgung, über verhältnismäßig große Prozessierungskapazität verfügen, ist das Gesamtsystem konsequent auf Ressourcenschonung im Bereich Energieverbrauch und Kommunikationsbandbreite ausgelegt. Vor allem die spezialisierte Software von Sensorknoten und Controller-Ebene und ihre mitunter notwendige Anpassung im Laufe eines Feldeinsatzes macht eine Formalisierungslogik in Hardwarenähe unbrauchbar. Die kompakte Datenübertragung über die modulare TCP/IP-Schnittstelle zur effizienten und echtzeitnahen Übertragung nach außen ist im Gesamtkonzept des Sensorsystems fest verwoben. Die Umsetzung einer sensorseitigen Formalisierung wurde im Rahmen des Projekts nicht weiter verfolgt.

5.3.2. Diensteseitige Formalisierung

Eine diensteseitige Formalisierung verlagert die Modellierung und Durchführung der Formalisierungslogik weiter in die Richtung der SWE-basierten Diensteebene, um

sensorzugehörige Systeme zu entlasten und Ressourcenlimitierung zu umgehen (siehe Abbildung 21). Als Beispiel für diese Variante wurde im SLEWS-Projekt ein entsprechendes Modell implementiert, bei dem die Rohdaten der Controller-Ebene direkt in die Datenhaltung des SOS übertragen und dort unter Verantwortung des Dienstebetreibers umgewandelt und formalisiert werden. Trotz der klaren Freistellung des Sensorsystems resultiert diese Methode erneut in einer engen Verzahnung von Sensor- und Dienstebene und dadurch in einem Verlust an Interoperabilität.

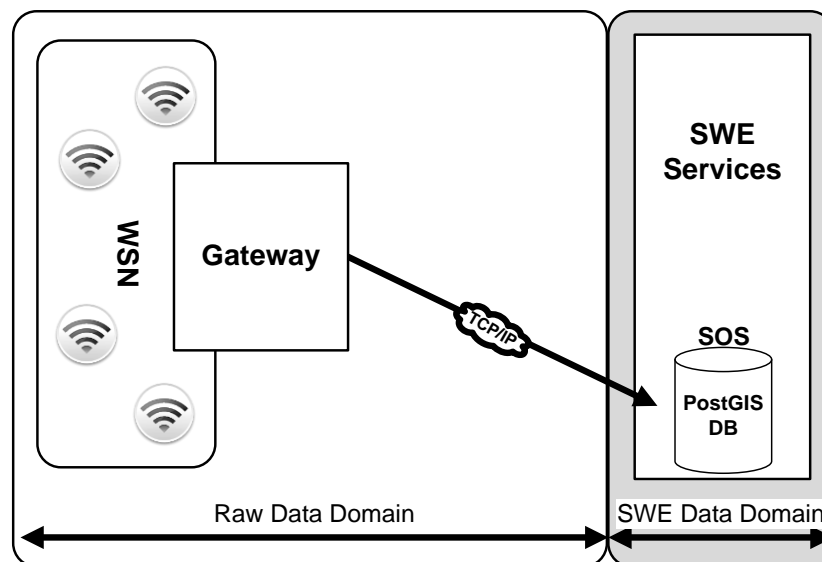


Abbildung 21: Prinzip der diensteseitigen Formalisierung von Rohdaten zum Eintrag in eine SWE-basierte Dienstebene (WSN = Wireless Sensor Network)

Als Folgerung muss ein plausibler Lösungsansatz in der Verwendung einer Vermittlungsschicht bestehen, um die Interoperabilität zwischen Sensor- und Dienstebene zu erhöhen. Verschiedene Projekte (Bleier et al., 2009, Gigan & Atkinson, 2007) liefern entsprechende Konzepte zur Abstraktion der Sensorprotokolle gegenüber der Dienstebene durch eine besagte Zwischenschicht. Doch auch hier bleiben Anfertigungen von spezifischen Formalisierungsadaptoren auf beiden Seiten dieser Schicht weiterhin notwendig. Vielversprechende und vom OGC vorangetriebene Ansätze für eine vereinfachte automatisierte Kopplung liefern das Sensor Interface Model (OGC, 2010b) und das PUCK-Protokoll (OGC, 2012), die durch die hardwarenahe Verwendung bzw. Erweiterung von SensorML die standardisierte Hinterlegung von Sensorschnittstellenbeschreibungen vorsehen. Durch den Einsatz von entsprechenden Interpreter-Anwendungen werden diese Beschreibungen zur automatischen Erstellung von Adaptern bzw. Universaltreibern verwendet, die zwischen nativen Sensorprotokollen und SWE-Diensten vermitteln. Doch auch diese Ansätze, die maßgeblich von einer direkten 1:1-Netzwerkcommunication zwischen Sensorsystem und Vermittlungsschicht ausgehen, decken die existierenden Szenarien nicht ausreichend genug ab, um als universelle Lösung gelten zu können. In vielen Anwendungsszenarien haben Nutzer und potentielle Anbieter von Sensormessungen keinen direkten Zugriff auf die Quelle bzw. den direkten Output des Sensorsystems, sondern sind auf vorverarbeitete Zwischenformate in Datei- oder Datenbankform angewiesen. Eine auf die direkte Kopplung an das Sensorsystem ausgerichtete Strategie ist dabei oft nicht

praktikabel, zumal ein vorgelagerter Eingriff des Nutzers in Form von Vorverarbeitung und Modellierung (z.B. bei komplexen Beobachtungen) oft unabdingbar ist. Dies gilt besonders für komplexe Systemhierarchien und Zusammenschlüsse verschiedener heterogener Messsysteme, die über einen zentralen Zugriffspunkt bzw. Gateway abgefragt werden (n:1-Kommunikation), dessen Output sich nicht in einer einfachen Protokollbeschreibung wiedergeben lässt.

Dass ein Bedarf nach einfachen, flexiblen und nutzerzentrierten Vermittlungsmechanismen zwischen Sensor- und Anwendungsebene hoch ist, zeigt besonders die Beliebtheit alternativer und nichtstandardisierter Ansätze von Projekten wie z.B. der Sensordatenplattform Pachube. Anwendungsanalysen der inzwischen sehr breiten Nutzerbasis (Pachube, 2011) zeigen, dass sich auf „unterer“ Sensorebene einfache Austauschformate zur Dateneinbringung wie CSV (Comma-Separated Values) und JSON (JavaScript Object Notation) und erst auf „höherer“ anwendungsnaher Ebene XML-basierte Formate als erwünscht und praktikabel erwiesen haben. In ähnlicher Herangehensweise präsentieren (Walter & Nash 2009) den Vorschlag für ein semi-automatisiertes nutzerzentriertes Modell, bei dem die Vermittlungsschicht in zwei verschiedene Ebenen aufgeteilt wird, um durch Kapselung die Komplexität des Formalisierungsvorgangs in Richtung der Sensorebene zu abstrahieren. Bestandteil dieses Konzepts ist eine webservice-basierte Feeder-Anwendung (z.B. 52° North, 2008), die die SWE-basierte Formatierung und Übertragung in die Diensteebene vornimmt und diese dadurch funktional kapselt. Hierbei abstrahiert die Feeder-Anwendung verschiedene technische Details der nachstehenden Infrastruktur, wie z.B. Informationen zur Übertragungsart der Daten in einen angeschlossenen SOS, die, je nach Implementation, HTTP-basiert (SOS-T) oder TCP/IP-basiert (Datenbankschnittstelle) möglich sein kann. Die Feeder-Anwendung kann darüber hinaus als Einstiegs- und Vermittlungspunkt zwischen Datenanbietern und SOS fungieren (siehe Abbildung 22). Verschiedene SOS könnten durch eine Feeder-Anwendung entweder hierarchisch, z.B. zur Lastverteilung oder Ausfallsicherheit mithilfe redundanter Backupsysteme, oder aber thematisch, z.B. zur fachlichen Sortierung und Eingliederung von Sensordaten, organisiert werden. Für die Datenanbieter entfällt die Notwendigkeit, detaillierte Informationen der Beschaffenheit oder Organisation eines SOS kennen zu müssen, um ihre Daten einstellen zu können.

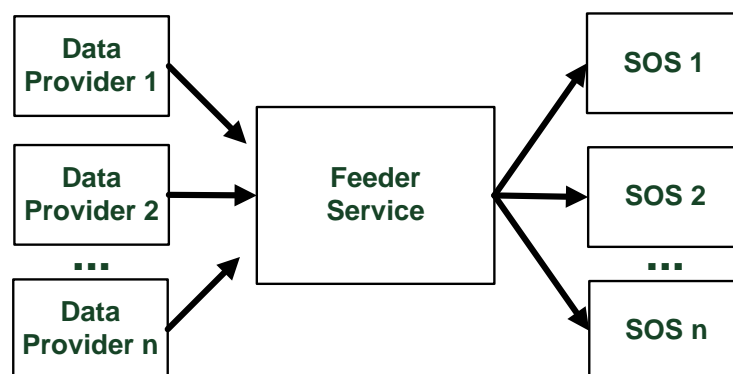


Abbildung 22: Vermittlung von Daten diverser Quellen an unterschiedliche SOS-Instanzen über eine zentrale Feeder-Anwendung

Die Umformung und Anwendung der Formalisierungslogik fällt in den Aufgabenbereich von flexiblen SWE Connector-Anwendungen, welche einzelne fallspezifische Anwendungen zur Verbindung mit Sensorsystemen darstellen. SWE Connector-Anwendungen bringen dabei Werkzeuge mit sich, um sich über verschiedene verbreitete netzwerkbasierende Kommunikationsprotokolle mit Sensorsystemen zu verbinden. Als Beispiel können Daten unter anderem über TCP/IP-basierte Stream- oder Datenbankverbindungen oder über HTTP-basierte Dateiübertragung, z.B. im CSV-Format, übermittelt werden. Entsprechende Verbindungsparameter des Sensorsystems müssen vom Nutzer übergeben werden. Gleiches gilt für Anweisungen, wie Rohdatenblöcke zu interpretieren und entsprechende Schlüsselp Parameter durch SWE-basierte Identifikatoren zu ersetzen bzw. erweitern sind. In einem nächsten Schritt werden die formalisierten Daten von der SWE-Connector-Anwendung zur Feeder-Anwendung übertragen. Da eine endgültige O&M-basierte Umformatierung der Daten erst dort durchgeführt werden muss, kann diese Übertragung zur Einsparung von Netzwerkressourcen in einem kompakten Mittelformat (wie z.B. JSON) erfolgen. Besonders bei einer höheren Anzahl von Komponenten auf beiden Seiten der Vermittlungsschicht würde sich diese Einsparung positiv auswirken. Abbildung 23 zeigt ein Beispielszenario des Gesamtkonzeptes unter der Dateneinbringung eines Sensorsystems.

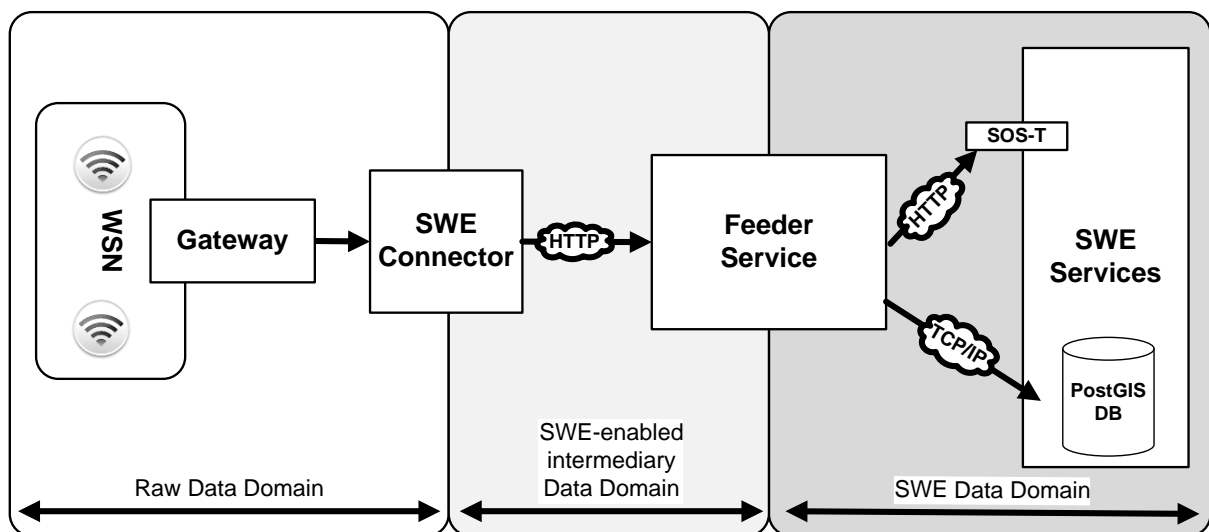


Abbildung 23: Prinzip der diensteseitigen Formalisierung unter Nutzung des Feeder-/SWE Connector-Prinzips (WSN = Wireless Sensor Network)

Die flexible Modellierung des Formalisierungsvorgangs unter Aufsicht des Nutzers, die bei Bedarf auch unabhängig vom spezifischen Protokoll des Sensorsystems durchgeführt werden kann, stellt einen wesentlichen Vorteil des Feeder-/SWE Connector-Konzeptes dar. Anders als bei den Ansätzen zur automatisierten Kopplung kann auf besondere Sachverhalte, wie die Beobachtungsmodellierung, eingegangen werden. Weiterhin führt die zweischichtige Funktionskapselung, bei entsprechender Unterstützung und Nutzerführung der Formalisierung im Bereich der SWE Connector-Anwendungen, wie z.B. durch eine übersichtliche im Browser ausgeführte Web-

anwendung, zu einer wesentlichen Vereinfachung der Verbindung von Sensor- und Anwendungsebene.

Im Rahmen des SLEWS-Projekts wurde, neben der bereits erwähnten Implementierung, ein weiteres Modell zur diensteseitigen Formalisierung umgesetzt. Der Prototyp orientiert sich an den Grundzügen des beschriebenen Feeder-/SWE Connector-Prinzips, musste jedoch, den speziellen Anforderungen des Anwendungsszenarios entsprechend, angepasst und leistungsoptimiert werden. Im Folgenden werden diese Implementierungen näher beschrieben.

5.3.3. Umsetzungen diensteseitiger Formalisierung

Im Rahmen der eigenen Untersuchungen wurden zwei Varianten der diensteseitigen Formalisierung prototypisch implementiert. Variante 1 behandelt dabei ein Szenario, in dem die Rohdaten der Sensorebene direkt in die Datenhaltung der Diensteebene bzw. das zugrunde liegende Datenbanksystem des SOS übertragen und dort unter Verantwortung des Dienstebetreibers umgewandelt und formalisiert werden (siehe Abbildung 24). Aus Sicht der zuvor beschriebenen Gründe ist diese Variante zwar nicht zu bevorzugen, jedoch wurde im Rahmen der Projektarbeiten ein Bedarf für bestimmte Anwendungsfälle identifiziert. Hierbei handelt es sich maßgeblich um Szenarien, in denen es im Interesse des Sensorbetreibers ist, Rohdaten nicht in ihrer Ursprungsform nach außen zu kommunizieren und diese in Eigenverantwortung so nah wie möglich am eigenen Einflussbereich SWE-basiert aufzubereiten. Um auch die Nutzbarmachung solcher Datenquellen bestmöglich zu unterstützen, wurde ein datenbankbasierter Formalisierungsvorgang erarbeitet. Hierbei wurde im Rahmen des beschriebenen Szenarios davon ausgegangen, dass die Nutzung eines Datenbanksystems am wahrscheinlichsten vorliegt, bzw. Rohdaten über Zwischenformate (z.B. CSV) einfach in ein Datenbanksystem importierbar sind.

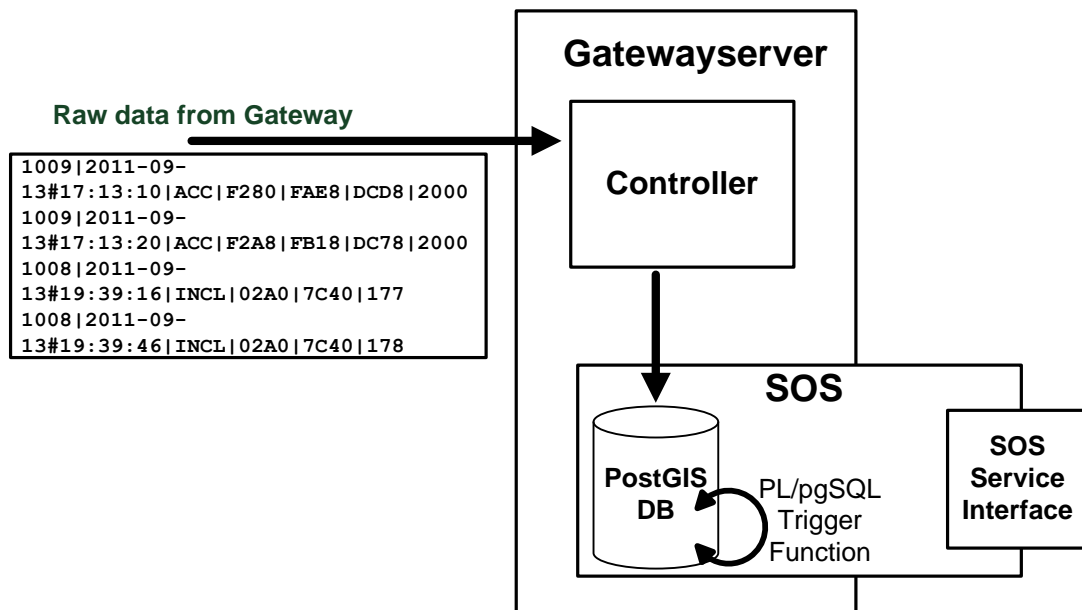


Abbildung 24: Umsetzung einer diensteseitigen Formalisierung von Rohdaten im Funktionsbereich des SOS

Als Beispielanwendung wurde das Data Logger-Modul der Controller-Ebene des Gatewayserver (siehe Kapitel 5.1.2, Abbildung 19) dahingehend modifiziert, Rohdaten des SLEWS-Sensornetzes lokal in die Datenhaltung eines PostgreSQL-Datenbanksystems (mit entsprechender räumlicher Erweiterung auch PostGIS genannt) zu übertragen. Hierbei wurde PostgreSQL gewählt, da auch die im Projekt verwendete SOS-Implementation (siehe Kapitel 5.4.1) auf einem PostgreSQL-Datenbanksystem aufsetzt. Zusätzlich unterstützt PostgreSQL die Nutzung sogenannter Trigger-Funktionen. Trigger-Funktionen sind programmierte Prozeduren, die im Datenbanksystem gespeichert werden und jeweils dann zur Ausführung kommen, wenn bestimmte Ereignisse auftreten. Ein solches Ereignis stellt beispielsweise die Nutzung eines *INSERT*- oder *UPDATE*-Kommandos auf eine Datenbanktabelle dar. Bei Eintreffen eines neuen Rohdatenpakets wird eine solche Trigger-Funktion ausgelöst, die die entsprechende Formalisierungslogik bzw. Regel ausführt und die resultierenden umgeformten Daten in die Datenhaltung bzw. Datenbanktabelle(n) des SOS überführt (siehe Abbildung 24). Im Fallbeispiel (z.B. Listing 5) sind die verwendeten Trigger-Funktionen durch die Nutzung des Regelsystems der PostgreSQL-Datenbank verfasst (PostgreSQL, 2012), können aber auch als Trigger-Funktionen mit Hilfe prozeduraler Programmiersprachen (z.B. PL/pgSQL) implementiert werden (PostgreSQL, 2012a). Trigger-Funktionen können in der Verantwortung des Systembetreibers einfach angepasst und erweitert werden. In dem angedachten Anwendungsszenario ist der Systembetreiber somit in der Lage, Rohdaten in Auszügen oder entsprechend abstrahiert bzw. angepasst SWE-basiert weiterzugeben. Durch die Eingliederung in das zugrunde liegende SOS-Datenbankschema können die Daten selbstständig über einen eigenen SOS des Systembetreibers oder aber über Export über einen anderen nachstehenden SOS angeboten werden.

```
CREATE OR REPLACE RULE offering_insert_actualization AS
ON INSERT TO observation DO
    (UPDATE offering SET min_time = new.time_stamp
    WHERE new.offering_id::text = offering.offering_id::text AND
    (new.time_stamp < offering.min_time OR offering.min_time IS NULL);
    UPDATE offering SET max_time = new.time_stamp
    WHERE new.offering_id::text = offering.offering_id::text AND
    (new.time_stamp > offering.max_time OR offering.max_time IS NULL);
);
```

Listing 5: Aktualisierung von Zeitintervallen verknüpfter Tabellen bei INSERT von neuen Datensätzen in Tabelle observation im PostGIS-Datenbanksystem des SOS

Trotz des sehr kompakten Systemdesigns und guter Performanz durch wenige Anwendungsübergänge ist die Nutzung dieser Variante, auch für den projektinternen Gebrauch, aufgrund fehlender Flexibilität nicht vorzuziehen. Insbesondere in Aussicht auf Anwendungsfälle wie der im „Geotechnologien“-Rahmenprogramm vorgesehenen Kooperation verschiedener Sensorsysteme unterschiedlichster Zuständigkeiten, ist eine größtmögliche Modularisierung zwischen Sensor- und Anwendungsebene anzustreben. Dementsprechend wurde Variante 2 der Umsetzung einer diensteseitigen Formalisierung nach den Grundzügen des Feeder-/SWE Connector-Prinzips (siehe Kapitel 5.3) implementiert. Während das ursprüngliche Konzept jedoch darauf ausgelegt ist, die dynamische m:n-Vernetzung von Komponenten ohne vorherige gegenseitige Kenntnis zu unterstützen, müssen im SLEWS-Projekt die beteiligten Hauptkomponenten im Vorhinein bekannt und im Rahmen des echtzeitnahen Anwendungsszenarios leistungsoptimiert vorliegen. Die Trennung zwischen SWE Connector-Anwendung und Feeder-Anwendung in zwei separate Systeme und die zugehörige Verwendung eines Zwischenformats zum Datenaustausch wurde deshalb nicht umgesetzt. Zur Implementierung kam die Programmiersprache C auf Linux-Basis zum Einsatz. Auszüge des Quellcodes sind in Listing 1 im Anhang zu finden. Die Anwendung wurde mit im Projekt gebräuchlichen Schnittstellenfunktionen ausgestattet, um Messdatenpakete TCP/IP-basiert per Stream- oder Datenbankverbindung aus Richtung des Sensorsystems abfragen und formalisiert TCP/IP-basiert per Datenbankverbindung oder HTTP-basiert über SOS-T in die Diensteebene einbringen zu können (siehe Abbildung 25).

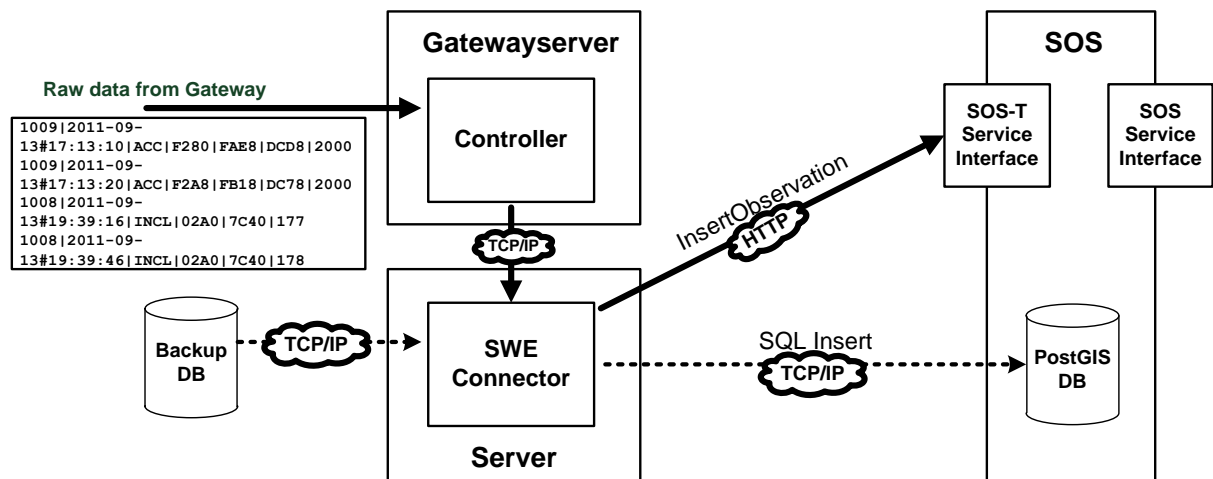


Abbildung 25: Umsetzung einer diensteseitigen Formalisierung von Rohdaten unter Nutzung einer SWE Connector-Anwendung

Die Abfrage der Messdatenpakete erfolgt wahlweise über die Verbindung mit dem TCP/IP Server-Modul des Gatewayserver oder optional über die Verbindung zu einem Backup-Datenbanksystem des Systembetreibers. Empfangene Messdatenpakete werden geparkt und unter Verwendung entsprechender Trennzeichen aufgeteilt. Nach Übernahme von Messwert und Messzeitpunkt werden die Angaben zu Knoten- und Sensoridentifikation unter Verwendung von Referenzdatensätzen umgewandelt bzw. formalisiert. Im Fall eines nachstehenden SOS-T werden die Datensätze O&M-formatiert durch Aufruf der Operation *InsertObservation* unter Verwendung der URL der Dienstschnittstelle übertragen (siehe Listing 6), wobei die datenbankinterne Speicherung vom SOS selbst übernommen wird. Alternativ dazu können die Datensätze unter Angabe der Tabellenstruktur und Verbindungsparameter direkt per SQL-Insert in die Datenbank des nachstehenden SOS eingefügt werden (Listing 7).

```
<InsertObservation xmlns=http://www.opengis.net/sos/1.0 [...] service="SOS" version="1.0.0">
  <AssignedSensorId>urn:SLEWS:sensor:slewsNode2241</AssignedSensorId>
  <om:Measurement>
    <om:samplingTime>
      <gml:TimeInstant>
        <gml:timePosition>2009-06-09T13:37:00+02</gml:timePosition>
      </gml:TimeInstant>
    </om:samplingTime>
    <om:procedure xlink:href="urn:SLEWS:sensor:slewsNode2241"/>
    <om:observedProperty
      xlink:href="urn:ogc:def:phenomenon:EDCS:2005:atm_pressure"/>
    <om:featureOfInterest>
      <sa:SamplingPoint gml:id="01">
        </sa:SamplingPoint>
      </om:featureOfInterest>
      <om:result uom="pascal">101325</om:result>
    </om:Measurement>
  </InsertObservation>
```

Listing 6: O&M-basierte Codierung einer *InsertObservation*-Anfrage an einen transaktionalen SOS (SOS-T)

```
INSERT INTO observation (time_stamp, procedure_id, feature_of_interest_id, phenomenon_id,
offering_id, text_value) VALUES ('2009-06-09T13:37:00', 'urn:SLEWS:sensor:slewsNode2241', '01',
'urn:ogc:def:phenomenon:EDCS:2005:atm_pressure', 'ATM_PRESSURE' '101325');
```

Listing 7: SQL-basierte Insert-Anfrage an das PostGIS-Datenbanksystem eines SOS

Alle Funktionsvarianten und Kombinationen von Abfrage und Einbringung der Daten stehen flexibel zur Verfügung und können beim Aufruf der Anwendung über die Kommandozeile durch die Angabe von Funktionsparametern festgelegt werden. Gleiches gilt für den Vorgang der Modellierung der Messdaten als einfache oder komplexe Beobachtungen, der je nach Bedarf umgestellt werden kann. Während die Identifikatoren für den Formalisierungsvorgang im Prototyp der Anwendung fest im Quelltext eingebracht sind, sieht eine Weiterentwicklung die Form der Übergabe per externe Parameterdatei vor. Hierbei liegt jeweils eine CSV-formatierte Textdatei für Knoten- und Sensoridentifikatoren vor. Die Nutzung von editierbaren Parameterdateien stellt einen deutlichen Zugewinn an Flexibilität dar, da Identifikatoren und weitere SWE-Parameter bei Veränderung des Sensorsystems, wie z.B. bei Hinzufügen oder Entfernen von Sensoren oder Sensorknoten, einfach bearbeitet und erweitert werden können, ohne den Quelltext der Anwendung abändern zu müssen. Analog zur genannten Umstellung der Beobachtungsmodellierung können auch in dieser Variante zwei Sätze von Parameterdateien, jeweils für die einfache und die komplexe Modellierung, vorliegen.

Die hier beschriebene prototypische Implementierung setzt mangels ersten Bedarfs keine wie Kapitel 5.3 angedachte vereinfachte webbasierte Nutzerführung zur Konfiguration der Vermittlungsanwendung um. Diese wäre durch den Ausbau der bestehenden Anwendung gut integrierbar, um zukünftig externen Nutzern und Betreibern von Sensorsystemen die Verbindung mit der SLEWS-Diensteebene zu vereinfachen. Parameter zur Abfrage der Daten vom Sensorsystem sowie Art der Einbringung in den nachstehenden SOS wären einfach über eine formularbasierte Webanwendung im Browser zu übergeben. Gleiches gilt grundsätzlich für die Identifikatoren zur SWE-basierten Formalisierung wie auch die durchzuführende Art der Beobachtungsmodellierung. Zu implementieren bliebe die Umsetzung der Anpassung an neue Messdatenformatierungen, die unter Abfrage entsprechender Trennzeichen, Länge und Segmentreihenfolge innerhalb eines Messdatenpakets ebenfalls zu verwirklichen wäre. Nicht ausreichend geklärt, weder in diesem konkreten Fall noch generell im Rahmen der SWE-Initiative selbst, ist hingegen die Art, wie Nutzer bei der Recherche und der semantisch korrekten Verwendung von Identifikatoren unterstützt werden können. Sowohl zur Bereitstellung für den Formalisierungsprozess der Rohdaten, wie auch bei der Erstellung von SensorML-Dokumenten und Erstkonfiguration eines SOS vor der Dateneinbringung, ist die korrekte und kohärente Verwendung von Identifikatoren für eine spätere Interoperabilität auf Anwendungsebene unabdingbar. Zusammenhängend mit der Codierung von Charakteristika des SLEWS-Sensorsystems in SensorML soll diese Thematik in Kapitel 5.5 weiter diskutiert werden.

5.4. Datenverwaltung und -bereitstellung

5.4.1. Implementation des Sensor Observation Service

Der Sensor Observation Service stellt das Herzstück der Diensteebene dar. Umsetzungen des Standards in der Version 1.0 (z.B. in 52° North, 2011, Mapserver, 2007, OOSTethys, 2012, deegree, 2011) existieren ausschließlich in Form von *Free and Open Source Software* (FOSS) verschiedener Hersteller, die sich vor allem in Entwicklungsstand und Nutzbarkeit unterscheiden. Im Rahmen der Recherchen zu Projektbeginn fiel die Wahl auf die Umsetzung der 52° North Initiative, die zu diesem Zeitpunkt den ausgereiftesten und anpassbarsten Charakter aufwies. Zur Umsetzung des Prototyps kam der *52° North Sensor Observation Service* in der Version 3.0.1 zum Einsatz. Hierbei handelt es sich um ein Java-basiertes Webservice-Paket, welches zur Ausführung eine *Java Runtime Environment/ Java Development Kit* ab Version 1.5, *Apache Jakarta Tomcat* ab Version 5.5 und das Datenbanksystem *PostgreSQL* ab Version 8.1.3 zusammen mit der räumlichen Erweiterung *PostGIS* ab Version 1.1.1 benötigt. An Schnittstellenoperationen werden die Profile *Core*, *Transactional* und in Auszügen *Enhanced* umgesetzt. Alle Operationen sind, mit Ausnahme der *GetCapabilities*-Abfrage, über die Methode HTTP Post aufrufbar. Wichtigster Bestandteil, neben der programmierten Anwendungslogik, ist vor allem die zugrunde liegende Datenhaltung, die auf dem Datenbanksystem *PostgreSQL* bzw. der räumlichen Erweiterung *PostGIS* aufsetzt. Das zugrunde liegende Datenbankschema ist konzeptionell eng an das Modell der *SWE observation* angelehnt und besteht aus 16 Tabellen (siehe Abbildung 26).

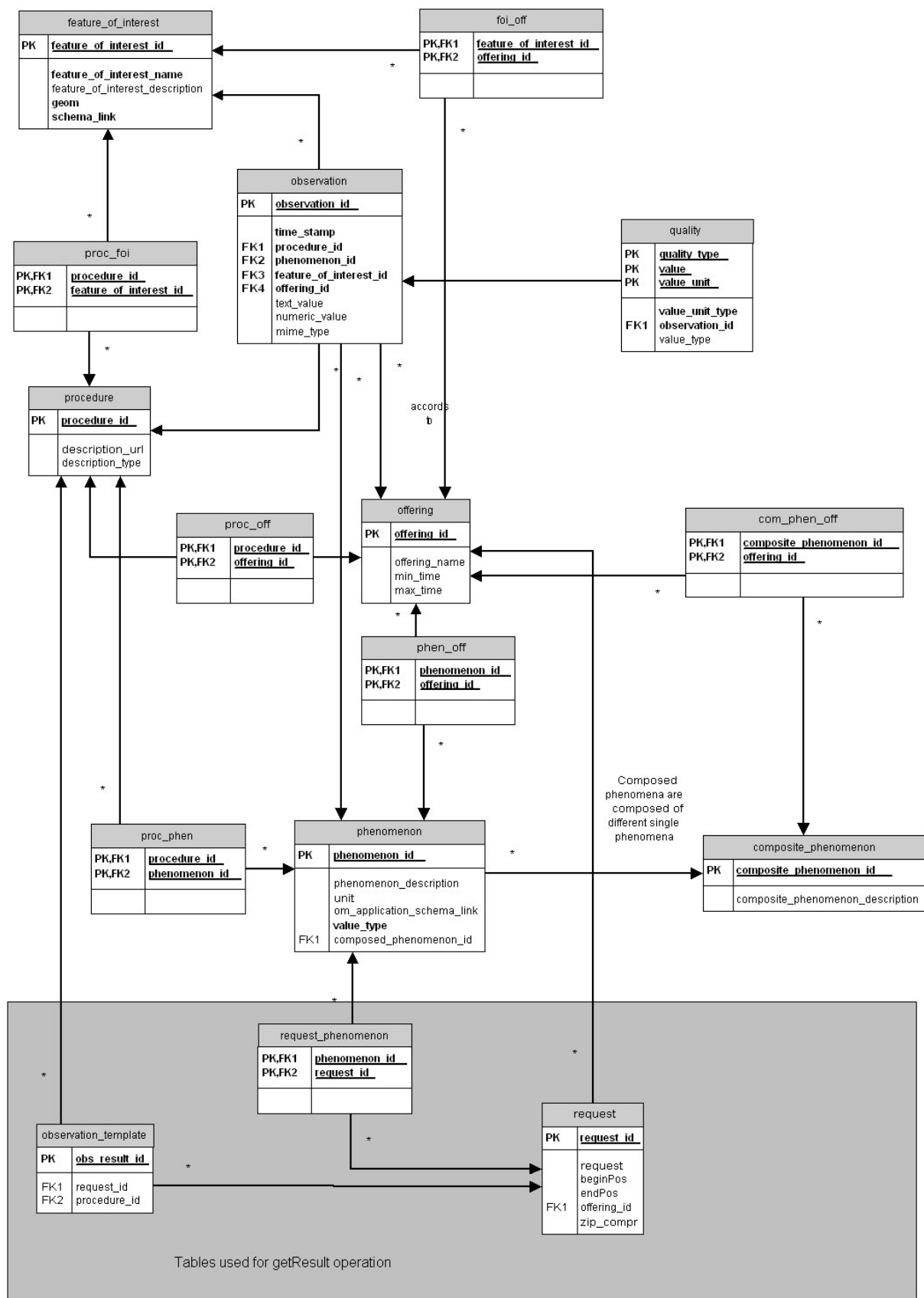


Abbildung 26: Datenbankschema des 52° North Sensor Observation Service V 3.0.1 (nach 52°North, 2011)

Die zentralen Tabellen dieses Schemas sind *feature_of_interest*, *procedure* und *phenomenon* für die Speicherung der entsprechenden Identifikatoren, während in der Tabelle *observation* die eigentlichen Messdaten gespeichert werden. Hinzu kommen die Tabellen *offering*, zur Speicherung der thematischen Organisation der Messdaten, sowie *composite_phenomenon* zur optionalen Speicherung und Organisation von komplexen Beobachtungsmodellen. Zur Erfassung von Qualitätsattributen steht, wie grundsätzlich auch im O&M-Modell vorgesehen, die Tabelle *quality* zur Verfügung, deren Nutzung jedoch ebenfalls optional ist. Die bisher nicht zur weiteren Auswertung verwendeten Messungen der Platinentemperatur der SLEWS-Sensorknoten könnten beispielsweise an dieser Stelle für eine spätere Verwendung hinterlegt werden. Bevor Messdatensätze in die Tabelle *observation* eingefügt werden können (siehe Listing 6 und 7), müssen Parameter und Identifikatoren in den Tabellen *phenomenon*, *procedure* etc. bereits eingerichtet sein, um als Fremdschlüssel fungieren zu können. Diese Erstkonfiguration kann entweder datenbankintern durch den Betreiber oder per Übergabe eines SensorML-Dokuments (SOS-T) geschehen und muss für jede neue Kombination von Sensorknoten/Phänomen etc. erneut durchgeführt werden. Zuvor zur Formalisierung und Datenmodellierung durchgeführte konzeptionelle Überlegungen müssen an diesen Stellen entsprechend wiedergespiegelt werden.

5.4.2. Datenmodellierung im SOS

Die Organisation der Daten im SOS muss in enger Abstimmung mit dem Formalisierungsvorgang bei der Einbringung und den späteren Anforderungen beim Zugriff modelliert werden. Aus Sicht der Nutzer- und Anwendungsebene spiegelt sich diese u.a. im Angebot der durch die Messdaten der Sensorknoten repräsentierten Phänomene (*phenomenon*) und ihre Gruppierungen in Form von *observation offerings* (kurz *offerings*) im *GetCapabilities*-Dokument eines SOS wider. Eine *offering* kann dabei analog zu einem Datenlayer im Kontext anderer Dienste und Anwendungen im GIS-Bereich betrachtet werden und dient zur beliebigen fachlichen/zeitlichen/räumlichen Aggregation von Messdaten. Als Beispiel für eine thematische Gruppierung gilt z.B. die Zusammenfassung der Druckmessungen aller Sensorknoten des SLEWS-Sensorsystems in die *offering* „Atmosphärischer Druck“ bzw. „ATM_PRESSURE“ (siehe Listing 8).

```

<sos:ObservationOffering gml:id="ATM_PRESSURE">
  <gml:name>Atmospheric pressure measured on SLEWS node #(see feature ID)</gml:name>
  <gml:boundedBy>
    <gml:Envelope srsName="urn:ogc:def:crs:EPSG:4326">
      <gml:lowerCorner>6.075389 50.773329</gml:lowerCorner>
      <gml:upperCorner>6.075989 50.773969</gml:upperCorner>
    </gml:Envelope>
  </gml:boundedBy>
  <sos:time>
    <gml:TimePeriod xsi:type="gml:TimePeriodType">
      <gml:beginPosition>2009-05-10T10:15:00+02:00</gml:beginPosition>
      <gml:endPosition>2010-02-08T03:59:00+01:00</gml:endPosition>
    </gml:TimePeriod>
  </sos:time>
  <sos:procedure xlink:href="urn:SLEWS:sensor:slewsNode1126"/>
  <sos:procedure xlink:href="urn:SLEWS:sensor:slewsNode128"/>
  [...]
  <sos:observedProperty xlink:href="urn:ogc:def:phenomenon:EDCS:2005:atm_pressure"/>
  <sos:featureOfInterest xlink:href="1126"/>
  <sos:featureOfInterest xlink:href="128"/>
  [...]
</sos:ObservationOffering>

```

Listing 8: Auszug aus dem GetCapabilities-Dokument des SLEWS-SOS (*offering* ATM_PRESSURE)

Während die Modellierung für die eindimensionalen Beobachtungen der Seilzugweg-aufnehmer und Drucksensoren relativ geradlinig ist (analog zum genannten Beispiel ist die Beziehung von *observation* zu *phenomenon* zu *offering* → 1:1:1), muss der Umgang mit den komplexen mehrdimensionalen Beobachtungen der Beschleunigungs- und Neigungssensoren besonders berücksichtigt werden. Eine Beibehaltung der komplexen Form entlang der Verarbeitungskette würde den Aufwand für Formalisierung, Einbringung und Zugriff der Daten zwar verringern, da keine Ummodellierung und Aufteilung einzelner mehr- in verschiedene eindimensionale Beobachtungen (Beziehung 1:n:n) vorgenommen werden muss, erschwert dadurch jedoch die Eingliederung in einen semantisch interoperablen Rahmen. Da die semantischen Mechanismen der SWE-Initiative zur unverwechselbaren Beschreibung und Identifizierung solch spezifischer Beobachtungen auf dem jetzigen Entwicklungsstand noch nicht ausgereift genug sind, sollte es deshalb ein Ziel sein, Daten in möglichst grundlegender und für Außenstehende nachvollziehbarer Art zu modellieren. Allerdings muss auch, wie bei der zielgerichteten Verwertung der Daten im Projekt SLEWS vorausgesetzt, zwischen Anwendungseffizienz z.B. durch Einsparung von Diensteaufrufen und Verarbeitungsschritten und Interoperabilität zu externen Datenquellen abgewogen werden.

Als Mittelweg bietet sich die Formung sogenannter *composite phenomenon* an. Konform zum O&M-Modell ist es möglich, Daten verschiedener einfacher Beobachtungen zu einem komplexen synthetischen Phänomen zusammenzuführen (z.B. Beschleunigung_X, -_Y, -_Z zu Beschleunigung_3D). Im Rahmen der Formalisierung komplexe mehrdimensionale erst in einfache eindimensionale Beobachtungen aufzuteilen, sie separat im SOS zu hinterlegen, um sie anschließend wieder zu komplexen Beobachtungen zusammenzufügen, ist zwar generell ein Mehraufwand, dennoch ermöglicht die Art der Hinterlegung das Angebot der Messdaten auf flexible Art für verschiedene Anwendungsfälle. Je nach Bedarf können die Daten einer Messbe-

obachtung über einen einzelnen Aufruf eines komplexen *composite phenomenon* bzw. der beinhaltenden *offering* (z.B. Beschleunigung_3D bzw. ACCELERATION_3D) oder über mehrere Aufrufe verschiedener einfacher *phenomenon* und beinhaltender *offerings* (Beschleunigung_X, -_Y, -_Z bzw. urn:[...]:acceleration_x, -_y, -_z) abgerufen werden. Da die Umsetzung von *composite phenomenon* innerhalb des SOS nur organisatorisch realisiert ist und entsprechende Abfragen erst zur Laufzeit aus einfachen *phenomenon* gruppiert werden, erfolgt die zugrunde liegende Datenspeicherung redundanzfrei. Die beschriebene Ummodellierung resultiert bei den entsprechenden komplexen Beobachtungen in einer Phänomenanzahl, die sich aus der Anzahl der Messdimensionen zuzüglich eines komplexen Phänomens zusammensetzt (siehe Tabelle 6). Analog zum oben genannten Beispiel zur Aggregation ergibt sich weiterhin eine zusätzliche *offering* zur Gruppierung des komplexen Phänomens.

Tabelle 6: observation | phenomenon | offering am Beispiel Beschleunigung (komplex) und Druck (einfach)

Observation	Phenomenon	Offering
Beschleunigung (x y z)	urn:[...]:acceleration_x, urn:[...]:acceleration_y, urn:[...]:acceleration_z, urn:[...]:acceleration_3d	ACCELERATION_X_AXIS, ACCELERATION_Y_AXIS, ACCELERATION_Z_AXIS, ACCELERATION_3D
Atmosphärischer Druck (x)	urn:[...]:atm_pressure	ATMOSPHERIC_PRESSURE

In den bisherigen Ausführungen wurde aus Anschauungsgründen davon ausgegangen, dass eine thematische Gruppierung nach Phänomenen in jeweils eine *offering* erfolgt. Ein großer Vorteil dieser Vorgehensweise besteht darin, alle Daten einer Phänomenart des Sensornetzes auf einen Blick zusammenführen zu können. Alternativ dazu kann eine Gruppierung z.B. nach Sensorknoten erfolgen, wobei alle beobachteten Phänomene jeweils eines Sensorknotens zusammen gruppiert werden. Da pro *GetObservation*-Aufruf an einen SOS die Nennung nur einer *offering* möglich ist, besteht der Unterschied zwischen beiden Varianten maßgeblich darin, welche Daten wie vieler Sensorknoten mit einem Aufruf abfragbar sind. Während mit der ersten genannten Variante (*offering* „Atmosphärischer Druck“) alle Sensorknoten, die im Sensornetzwerk die gleiche Phänomenart messen, in einem Aufruf abgefragt werden können, muss bei der zweiten Variante (*offering* z.B. „Sensorknoten XY“) pro Sensorknoten eine separate Anfrage gestellt werden. Für einen zukünftigen Übergang von Implementationen der SOS-Spezifikation Version 1.0 auf 2.0 ist zu beachten, dass ab Version 2.0 nur noch eine *offering* pro Sensor bzw. *procedure* zulässig ist. Während es in der Version 1.0 noch wie beschrieben möglich ist, Messdaten verschiedener Sensoren bzw. *procedures* in einer *offering* zusammenzufassen, wurde diese Möglichkeit zugunsten der Vereinfachung der Informationsmodellierung begrenzt. Wie zuvor in Variante 2 gezeigt, würde diese Beschränkung zwangsläufig zu einer Organisation der *offerings* gruppiert nach Sensorknoten führen. Die Abfrage der Messdaten einer Phänomenart aller Sensorknoten mit nur einem Aufruf wäre somit nicht mehr möglich. Eine Anpassung

kosmetischer Natur wäre die Anfertigung einer jeweils eigenen *offering* pro Sensorknoten und Phänomen (z.B. *offering* „Beschl_X_Knoten1“, *offering* „Beschl_X_Knoten2“, etc.), was zu einer starken Vervielfältigung und Unübersichtlichkeit der Gesamtzahl von *offerings*, jedoch zu keiner Einsparung von Aufrufen zum Erhalt der Daten führen würde.

Die Modellierung der Datenverwaltung und –bereitstellung im SOS durch die Anpassung von (*composite*) *phenomenon* und *observation offerings* muss unter entsprechender Berücksichtigung der Anforderungen der späteren Anwendung und Verarbeitung der Messdaten durchgeführt werden. Weiterhin muss sie bei der Modellierung und Beschreibung des Sensornetzwerks in SensorML berücksichtigt werden.

5.4.3. Modellierung und Beschreibung des Sensornetzwerks in SensorML

Die Erfassung und Codierung von Eigenschaften eines Sensorsystems in SensorML stellt einen zentralen Grundpfeiler der SWE-Spezifikationsreihe dar und ermöglicht das Erfassen einer breiten Menge von Informationen. Hierbei kann es sich um sehr umfangreiche aber auch weitestgehend optionale Angaben zu verwendeten Komponenten, Ein- und Ausgabegrößen, Beobachtungsstandort, Einsatzdokumentation, Betreiber- und Herstellerinformationen, Rechtsverbindlichkeiten, internen Auswertungsprozessen etc. handeln. Nach konzeptionellen Vorgaben der SWE-Initiative stellt die Auffindung und Sichtung von SensorML-Dokumenten die initiale Vermittlung zum Austausch von Sensordaten zwischen Nutzer- bzw. Anwendungsebene und SWE-Diensteebene dar. Die in SensorML-Dokumenten enthaltenen Metainformationen und ihre zugehörigen Identifikatoren sollen Datenabnehmer zum entsprechenden datenführenden SOS führen, dessen anforderbares GetCapabilities-Dokument alle weiteren möglichen Interaktionen anstoßen soll. Nach diesem Auffindungsvorgang, dessen genauer Ablauf sich vor allem praktisch aber auch konzeptionell noch in der Entwicklungsphase befindet, dienen SensorML-Dokumente vor allem dazu, Messsysteme und Messvorgänge für Datenabnehmer zu dokumentieren und zu erläutern.

Obwohl die Anfertigung entsprechender Dokumente aus den genannten Gründen meist ein plausibler erster Schritt zur Planung eines SWE-basierten Systems ist, gewinnt er im Rahmen dieser Arbeit erst in der aktuellen Phase an Relevanz, vor allem da die bisherigen Ausführungen aus Richtung der Sensorebene und nicht aus Richtung der Nutzer- bzw. Anwendungssicht aufgebaut sind. Fragestellungen und Konzepte der zurückliegenden Kapitel, die sich auf die Modellierung der Daten entlang dieser Systemkette auswirken, müssen sich auch in der Codierung des Sensorsystems widerspiegeln. Weiterhin ist zu beachten, dass die angesprochene SensorML-basierte ad hoc-Vermittlung zwischen Sensor- und Anwendungsebene zwar relevant ist, aber beim Aufbau der grundlegenden Frühwarnkette eine zurückgestellte Rolle spielt, da alle Grundkomponenten im Vorhinein bekannt sein müssen. Grundsätzlich

darf die ad hoc-Vermittlung allerdings nicht außer Acht gelassen werden, da es ein erklärtes Grundziel des Projekts SLEWS und seines Rahmenprogramms ist, sich mit zuvor unbekannten externen Datenquellen verbinden und selbst als Datenquelle für externe Anwendungen dienen zu können.

Die Gestaltung des SensorML-Standards wurde gezielt generisch ausgelegt, um eine größtmögliche Flexibilität bei der Codierung vieler unterschiedlicher existierender Sensorsysteme zu gewährleisten. Dies hat zur Folge, dass sich die Vereinheitlichung von SensorML-Instanzen schwierig gestaltet. Selbst auf einem identischen Sensorsystem basierend, existiert eine große Wahrscheinlichkeit, dass verschiedene Betreiber unterschiedliche Ergebnisse bei der Codierung der Systemeigenschaften produzieren. Da einheitliche Vorlagen der SWE-Initiative noch in der Entwicklung sind (OGC, 2010c) und ihre Anwendung aufgrund der hohen Bandbreite von fallspezifischen Anwendungen sehr schwierig ist, gibt es keine klaren Vorgaben, welche Sensorsysteme wie in SensorML zu codieren sind. Gleiches gilt vor allem für die Codierung eines komplexen Sensornetzwerks, wie es in diesem Projekt vorliegt, und muss anwendungs- und fallspezifisch behandelt werden. Zu klären ist besonders die Abbildung von Organisation und Hierarchie des Sensornetzes. Ein SensorML-Dokument umfasst die Beschreibung eines Messdatenproduzenten, der als *procedure* identifiziert ist. Je nach Betrachtungsweise ist ein einzelner Detektor an Bord eines Sensorknotens, ein Sensorknoten selbst, oder das Sensornetz als Makroinstrument im Ganzen als Datenproduzent und somit als *procedure* zu interpretieren.

Die Wahl eines einzelnen Detektors als Organisationsgrundlage einer *procedure* erscheint grundsätzlich eher unpassend, da dieser aus technischer Sicht keinen eigenständigen Datenproduzent, sondern nur einen Teil eines Sensorknotens darstellt, ohne dessen Funktionen er nicht operieren könnte. Jedoch kann es zu speziellen Anwendungsfällen kommen, in denen die bisher gezeigte knotenbasierte Organisation auf Grenzen stößt. Dies wäre z.B. dann der Fall, wenn mehrere identische Detektoren, z.B. zu Zwecken der Kalibrierung und Überprüfung, das gleiche Phänomen an Bord eines einzelnen Sensorknotens beobachten sollen. Die notwendige Unterscheidung beider Detektoren wäre dadurch nicht auflösbar. Die Folge dieser Aufteilung hätte jedoch auch auf Ebene der Datenmodellierung im SOS Nachteile, wie z.B. die starke Vervielfältigung von *procedures* mit identischen zugeordneten Positionen (*feature of interest*) und *phenomenon*. Eine Gruppierung über *offering*, orientiert am Aufbau der Sensorknoten, könnte unter Nutzung eines SOS Version 1.0 eine vereinfachende Übersichtlichkeit schaffen, wäre jedoch mit einer Version 2.0 (Limitierung des Verhältnisses *procedure* zu *offering*: 1:1) nicht mehr möglich.

Die Zusammenfassung des gesamten Sensornetzes in Form eines Makroinstruments zu einer *procedure* bietet ebenfalls situationsabhängige Vor- und Nachteile. Die Struktur eines entsprechenden SensorML-Dokuments wäre aufgrund der abzubildenden Hierarchie kompliziert und umfangreich, da jeder einzelne Sensorknoten als Messressource bzw. Detektor eingebettet werden müsste, für

dessen ausführliche Beschreibung umfangreiche Untersegmentierungen notwendig wären (siehe Abbildung 27). Ein ausgesprochener Vorteil besteht jedoch in der Möglichkeit, *offerings* bei einem SOS in der Spezifikation Version 2.0 thematisch gruppiert nach jeweils einer Phänomenart modellieren zu können. Durch die Umgehung der Zuordnungslimitierung von *offering* und *procedure* könnten, so wie in der Spezifikation Version 1.0 noch möglich, alle Messungen aller Sensorknoten einer Phänomenart über eine *GetObservation*-Anfrage abgerufen werden.

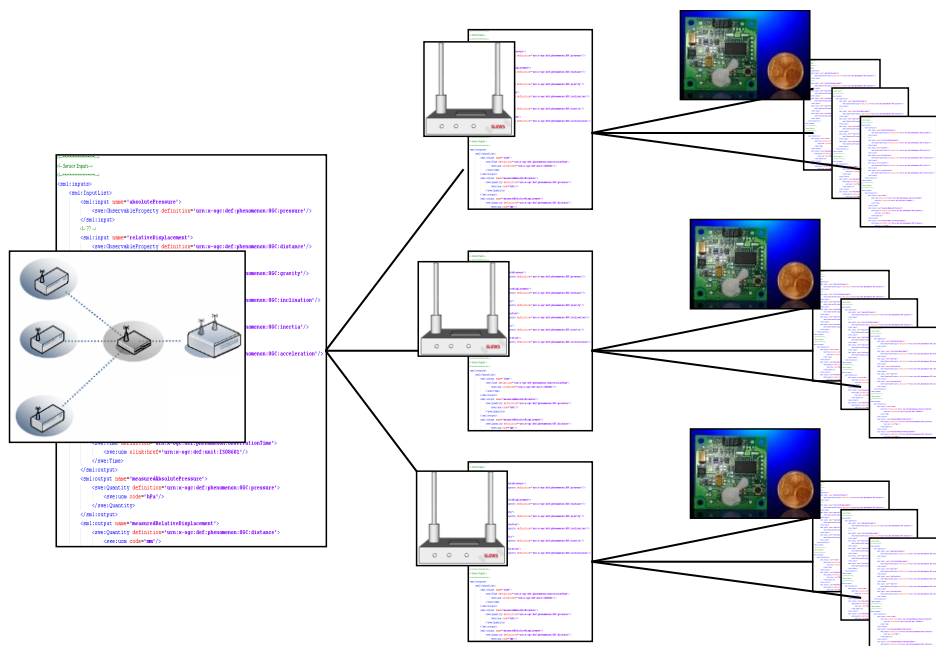


Abbildung 27: Hierarchie Sensornetz ← Sensorknoten ← Detektor bei der Erfassung in SensorML

Die Wahl eines Sensorknotens als kleinste Einheit zur Grundlage einer *procedure* erscheint für den Großteil von Anwendungsfällen insbesondere im Projekt SLEWS als naheliegende Wahl. Die Organisationsform orientiert sich am internen Aufbau des Sensornetzes mit Sensorknoten als initiale Datenquellen, die diskrete und im Feld gezielt ausgewählte Beobachtungspunkte (*feature of interest*) repräsentieren. Resultierende SensorML-Dokumente sind modular abgeschlossen und können bei Änderungen flexibel einzeln und unabhängig vom Rest modifiziert werden. Die naheliegende Datenmodellierung im SOS in Form von *offerings* ist knotenbasiert (in Version 1.0 noch optional, ab Version 2.0 verpflichtend) und ermöglicht den Aufruf aller Messdaten aller Phänomene eines Sensorknotens mit einer einzigen *GetObservation*-Anfrage. Aus Sicht der in Kapitel 4.2 beschriebenen Sensor- und Datenfusion umfasst diese Art der Datenabfrage einen logischen ersten Schritt, um an der entsprechenden Position auf ein reales Ereignis schließen zu können.

Weiterhin ist zu bedenken, wie die in den bisherigen Kapiteln erläuterten Vorgänge zur Formalisierung und Ummodellierung der Daten in den entsprechenden SensorML-Dokumenten der Sensorknoten wiederzugeben sind. Dies ist deshalb erforderlich, da sich das ursprüngliche Ausgabeformat eines Sensorknotens erheblich von dem im SOS hinterlegten Datenmodell unterscheidet (z.B. mehrere einfache statt

einer komplexen Beobachtung). Damit SensorML-Repräsentation und Datenmodellierung im SOS stimmig sind, müssen entsprechende Änderungen erfolgen und die Sensorbeschreibung an diese anwendungsorientierte Form angepasst werden. Diese Vorgehensweise widerspricht nicht dem ursprünglich angedachten „Plug&Play“-Konzept der SWE-Initiative, in dem ein Sensor so beschrieben sein soll, dass Client-Anwendungen durch die automatisierte Interpretation der hinterlegten SensorML-Angaben in der Lage sind, sich auf die abzufragenden Daten einzustellen, um diese problemlos automatisiert interpretieren zu können. Aufgrund der bisher beschriebenen Lücken und Defizite in diesem Konzept (z.B. Interoperabilitätslücke zwischen Sensor- und Diensteebene, Bestimmung allgemein interpretierbarer semantischer Identifikatoren) gestaltet sich die originalgetreue Beibehaltung der Daten und daraus folgend die Beschreibung des Sensorknotens als nicht praktikabel.

Eine ähnliche Frage stellt sich für die Dokumentation der durchgeführten Verarbeitungsschritte, die zwischen dem ursprünglichen Rohformat und dem Endprodukt der Daten liegen. Aus Sicht der projektinternen frühwarnungsbezogenen Anwendungen, die später automatisiert auf den Datenbestand des SOS zurückgreifen sollen, sind diese Angaben von geringerer Priorität als das entsprechend angepasste und optimierte Datenendprodukt selbst. Trotz der anwendungsorientierten Manipulation der Sensorbeschreibung bleiben auch übergreifende Anwendungsfälle, wie z.B. die entfernte Einbindung in externe Anwendungen, problemlos möglich, da sich die eigentlichen Messdaten lediglich in ihrer Organisationsform geändert haben, deren Interpretation durch die modifizierte SensorML-Repräsentation weiterhin ermöglicht und sogar vereinfacht wird. Ein Problemfall würde nur dann vorliegen, wenn externe Nutzer gezielt nach dem Sensorsystem bzw. den verbauten Detektoren suchen, um Messungen oder Prozessierungsergebnisse mit einem ähnlichen Sensorsystem abgleichen zu können. Das Angebot von unverarbeiteten Rohdaten über den SOS wäre in diesem Fall unumgänglich und Sensorbeschreibung sowie Datenmodellierung müssten entsprechend angepasst und erweitert werden. Ein derartiger Anwendungsfall konnte im Laufe der Projektarbeiten jedoch nicht identifiziert werden.

Als Folge der vorangegangenen Überlegungen zur Beschreibung eines SLEWS-Sensorknotens in SensorML resultiert ein Informationsprofil, dass die wesentlichsten Kernangaben zur Identifikation des Sensorknotens und seiner Detektoren, seinem Einsatzort sowie Ein- und Ausgabegrößen eindeutig bestimmt (siehe Listing 9). Listing 2 im Anhang umfasst das vollständige SensorML-Dokument.

```
<sml:SensorML xmlns:sml="http://www.opengis.net/sensorML/1.0.1" [...]>
  <sml:member>
    <sml:System>
      <!-- Discovery Metadata-->
      <sml:identification>[...]</sml:identification>
      <sml:classification>[...]</sml:classification>
      <sml:contact>[...]</sml:contact>
      <sml:capabilities>[...]</sml:capabilities>

      <!--System Position -->
      <sml:location>[...]</sml:location>

      <!--Sensor Inputs-->
      <sml:inputs>[...]</sml:inputs>

      <!--Sensor Outputs-->
      <sml:outputs>[...]</sml:outputs>

      <!-- Station Detector List -->
      <sml:components>[...]</sml:components>

      <!-- Station Internal Connections -->
      <sml:connections>[...]</sml:connections>

      <!-- System Communication Interfaces -->
      <sml:interfaces>[...]</sml:interfaces>
    </sml:System>
  </sml:member>
</sml:SensorML>
```

Listing 9: Übersichtsprofil des Aufbaus einer SensorML-Beschreibung eines SLEWS-Sensorknotens

Listing 10 zeigt Auszüge des Dokuments (*identification*, *classification*, *contact* und *location*), die Informationen zur Identifizierung und Beschreibung des Sensorknotens, Einsatzmission, möglichen Kontaktpersonen und räumlichen Position des Sensorknotens enthalten. Weiterführende Informationen zur Projektdokumentation, z.B. HTTP-Links zum Produktanbieter oder zur Projekthomepage, können beliebig hinzugefügt werden.

```
[...]
<!-- Discovery Metadata-->
<sml:identification>
  <sml:IdentifierList>
    <sml:identifier name="URN">
      <sml:Term definition="urn:ogc:def:identifierType:OGC:uniqueID">
        <sml:value>urn:ogc:object:feature:Sensor:SLEWS:slewsNode2241</sml:value>
      </sml:Term>
    </sml:identifier>
    <sml:identifier name="longName">
      <sml:Term definition="urn:ogc:def:identifier:OGC:longName">
        <sml:value>SLEWS customized Sensor Mote Prototype using ScatterNode Technology
      </sml:value>
    </sml:Term>
    </sml:identifier>
    [...]
  </sml:IdentifierList>
</sml:identification>
<sml:classification>
  <sml:ClassifierList>
    <sml:classifier name="Application">
      <sml:Term definition="urn:ogc:classifier:OGC:application">
        <sml:value>landslide detection</sml:value>
      </sml:Term>
    </sml:classifier>
    [...]
  </sml:ClassifierList>
</sml:classification>
<sml:contact role="urn:ogc:def:identifier:author" xlink:href="http://slews.de">
  <sml:ResponsibleParty>
    <sml:individualName>Kai Walter</sml:individualName>
    <sml:organizationName>Professorship for Geodesy and Geoinformatics, Rostock
      University
    </sml:organizationName>
    <sml:contactInfo>
      [...]
    </sml:contactInfo>
  </sml:ResponsibleParty>
</sml:contact>
<!--System Position -->
<sml:location>
  <gml:Point gml:id="MOTE_LOCATION" srsName="urn:ogc:def:crs:EPSG:6.1:4329">
    <gml:coordinates>50.776208,6.080085</gml:coordinates>
  </gml:Point>
</sml:location>
[...]
```

Listing 10: Auszug der SensorML-Beschreibung eines SLEWS-Sensorknotens (Bereiche Metabeschreibung und Position)

Listing 11 zeigt Auszüge des Dokuments mit notwendigen Angaben zur Beschreibung der durch den Sensorknoten beobachteten Naturphänomene (*inputs*) und der durch den Messvorgang dokumentierten Messphänomene (*outputs*). Die hier enthaltenen Informationen sind kritisch zur korrekten Interpretation von Messdaten des Sensorknotens.

```
[...]
<!--Sensor Inputs-->
<sml:inputs>
  <sml:InputList>
    <sml:input name="absolutePressure">
      <swe:ObservableProperty definition="urn:[...]:EDCS:2005:atm_pressure"/></sml:input>
    <sml:input name="relativeDisplacement">
      <swe:ObservableProperty definition="urn:[...]:EDCS:2005:length"/></sml:input>
    <sml:input name="inclination">
      <swe:ObservableProperty definition="urn:[...]:EDCS:2005:plane_angle"/></sml:input>
    <sml:input name="acceleration">
      <swe:ObservableProperty definition="urn:[...]:EDCS:2005:acceleration"/></sml:input>
    </sml:InputList>
  </sml:inputs>
  <!--Sensor Outputs-->
  <sml:outputs>
    <sml:OutputList>
      <sml:output name="time">
        <swe:Time definition="urn:x-ogc:def:phenomenon:observationTime">
          <swe:uom xlink:href="urn:x-ogc:def:unit:ISO8601"/>
        </swe:Time></sml:output>
      <sml:output name="measuredAbsolutePressure">
        <swe:Quantity definition=" urn:[...]:EDCS:2005:atm_pressure">
          <swe:uom code="hPa"/>
        </swe:Quantity></sml:output>
      <sml:output name="measuredRelativeDisplacement">
        <swe:Quantity definition=" urn:[...]:EDCS:2005:length">
          <swe:uom code="mm"/>
        </swe:Quantity></sml:output>
      <sml:output name="measuredInclination_X_axis">
        <swe:Quantity definition=" urn:[...]:EDCS:2005:plane_angle_x">
          <swe:uom code="deg"/>
        </swe:Quantity></sml:output>
      <sml:output name="measuredInclination_Y_axis">
        <swe:Quantity definition=" urn:[...]:EDCS:2005:plane_angle_y">
          <swe:uom code="deg"/>
        </swe:Quantity></sml:output>
      [...]
      <sml:output name="measuredAcceleration_X_axis">
        <swe:Quantity definition=" urn:[...]:EDCS:2005:acceleration_x">
          <swe:uom code="g"/>
        </swe:Quantity></sml:output>
      <sml:output name="measuredAcceleration_Y_axis">
        <swe:Quantity definition=" urn:[...]:EDCS:2005:acceleration_y">
          <swe:uom code="g"/>
        </swe:Quantity></sml:output>
      [...]
    </sml:OutputList>
  </sml:outputs>
[...]
```

Listing 11: Auszug der SensorML-Beschreibung eines SLEWS-Sensorknotens (System-Inputs und -Outputs)

Listing 12 zeigt einen Auszug des Dokuments (*components*) zur Beschreibung eines für die Messungen verantwortlichen Detektors an Bord des Sensorknotens. Die in dieser Sektion enthaltenen Angaben sollen die interne Zusammensetzung des Sensorknotens und seine verwendeten Komponenten, z.B. durch Angaben zu Hersteller, Seriennummer und Gerätespezifikationen, dokumentieren.


```
[...]
<!-- Station Detector List -->
<sml:components>
  <sml:ComponentList>
    <sml:component name="PressureSensor">
      <sml:Component gml:id="VTI_PressureSensor">
        <sml:identification>
          <sml:IdentifierList>
            <sml:identifier name="longName">
              <sml:Term definition="urn:ogc:def:identifier:longName">
                VTI Technologies SCP1000 Series 120 kPa</sml:Term>
            </sml:identifier>
            <sml:identifier name="modelName">
              <sml:Term definition="urn:ogc:def:identifier:modelNumber">
                D11</sml:Term>
            </sml:identifier>
          </sml:IdentifierList>
        </sml:identification>
        <sml:inputs>
          <sml:InputList>
            <sml:input name="absolutePressure">
              <swe:ObservableProperty definition=" urn:[...]:EDCS:2005:atm_pressure"/>
            </sml:input>
          </sml:InputList>
        </sml:inputs>
        <sml:outputs>
          <sml:OutputList>
            <sml:output name="measuredAbsolutePressure">
              <swe:Quantity definition=" urn:[...]:EDCS:2005:atm_pressure">
                <swe:uom code="hPa"/></swe:Quantity>
            </sml:output>
          </sml:OutputList>
        </sml:outputs>
        <sml:method xlink:href="urn:ogc:def:process:ogc:detector"/>
      </sml:Component>
    </sml:component>
  </sml:ComponentList>
</sml:components>
[...]
```

Listing 12: Auszug der SensorML-Beschreibung eines SLEWS-Sensorknotens (Detektorbeschreibung)

Der Informationsgehalt des gezeigten Profils stellt eine adäquate Menge von Beschreibungen bereit, um die Einbindung der Messdaten, im Zusammenspiel mit dem *GetCapabilities*-Dokument des SOS, zu ermöglichen. Eine ad hoc-Vermittlung zwischen Anwendungen und Sensorknoten ohne vorherige gegenseitige Kenntnis wird dadurch ebenfalls grundsätzlich unterstützt. Trotz der zuvor beschriebenen Notwendigkeit, dass alle Komponenten einer Frühwarnkette im Vorhinein bekannt sein müssen, kann eine ad hoc-Vermittlung nicht nur für externe Anwender, sondern auch für den projektinternen Gebrauch von Bedeutung sein, um darauf aufbauende Anwendungen die flexible Reaktion auf Veränderungen im Sensornetz zu ermöglichen. Nach einer initialen Grundabstimmung zwischen Anwendungsebene und Sensornetzwerk können beispielweise Veränderungen im Feld vorgenommen werden, ohne dass mögliche Auswirkungen auf die Anwendungsebene berücksichtigt werden müssen. Unter der Annahme, dass Veränderungen im Sensornetzwerk, wie z.B. das Hinzufügen von Sensorknoten, durch den Betreiber dokumentiert werden und in der Hinterlegung entsprechender neuer SensorML-Dokumente im SOS resultieren, kann eine entsprechend konzipierte Anwendung leicht auf diesen Umstand reagieren, indem das *GetCapabilities*-Dokument des SOS regelmäßig abgerufen und automatisiert nach neu hinzugefügten *procedure* durchsucht wird. Bei einem Fund liefert die *DescribeSensor*-Abfrage, unter Angabe des entsprechenden *procedure*

Identifikators, das entsprechende SensorML-Dokument des Sensorknotens zurück. Alle zur Einbindung der neuen Datenquelle relevanten Parameter, bei Angebot der für die Anwendung relevanten Messphänomene, stehen dadurch zur Verfügung und können dynamisch eingebunden werden.

Wie zuvor erwähnt befinden sich einheitliche Codierungsrichtlinien für SensorML, insbesondere Profilvorlagen für verschiedene Sensorarten, noch im Entwicklungsprozess der Arbeitsgruppen der OGC SWE-Initiative. Besonders Vorlagen zu discovery profiles (OGC, 2010c) zur Recherche und Auffindung von Sensoren und die Harmonisierungen mit gängigen standardisierten Katalogformaten (z.B. ISO 19115, ebRIM) werden dabei benötigt, um die ad hoc-Vermittelbarkeit von standardisierten Sensordaten voranzutreiben. Ein weiteres Defizit des SensorML-Standards, wie auch der gesamten OGC SWE-Formatreihe, besteht in diesem Zusammenhang darin, Sensoren, Phänomene und weitere Parameter semantisch eindeutig und unverwechselbar identifizieren zu können. Diese Problematik soll im folgenden Kapitel näher diskutiert werden.

5.5. Semantische Problemstellungen

Ziel der SWE-Initiative ist die Harmonisierung von Sensordaten und deren Austausch über Nutzung von standardisierten Datenformaten und Diensteschnittstellen. Während die syntaktische Anpassung von Daten durch Umsetzung der Standards SensorML und O&M und deren formulierte Codierungsrichtlinien geradlinig umzusetzen ist, gestaltet sich die Auswahl semantischer Angaben als deutlich schwieriger. Im Rahmen der genannten Standards werden zur Identifizierung von Objektbegriffen für u.a. Beobachtungs- und Messphänomen, Beobachtungsobjekt, Maßeinheit und Sensorsystem sogenannte Uniform Resource Identifier (URI) eingesetzt. URIs sind spezielle Zeichenketten und werden als Werte oder Attributwerte von XML-Elementen geführt und treten in den Unterformen Uniform Resource Name (URN), zur dauerhaften ortsunabhängigen Bezeichnung einer Ressource, und Uniform Resource Locator (URL), zur ortsabhängigen Bezeichnung einer Ressource und Zugriff über ein Netzwerkprotokoll (wie z.B. HTTP), auf. Ursprüngliche Konzepte der SWE-Reihe sehen zur objektbegrifflichen Auflösung von URIs entsprechende zentral geführte Verzeichnisse und Wörterbücher zur universellen Verwendung vor. Da sich die Schaffung solcher Nachschlagewerke für die Gesamtheit aller Sensoren aus offensichtlichen Gründen als schwierig herausstellt, existieren bisher keine einheitlichen und vor allem verbindlichen Mechanismen zur Nutzung von URIs.

Während zwar grundsätzlich Ressourcen für die Identifizierung von Umweltobjekten, Maßeinheiten etc. in Form von offiziellen Sammlungen (z.B. ISO Environmental Data Coding Specification, NASA Semantic Web for Earth and Environmental Terminology, Unified Code for Units of Measure), fachbereichsspezifischen Wörterbüchern und Diskussionsberichten seitens des OGC vorliegen (OGC, 2002, OGC, 2008b), sind

diese jedoch bei weitem nicht umfassend genug, um alle möglichen Anwendungsfälle abzudecken. Weiterhin bleibt ihre Verwendung der freien Wahl des Nutzers überlassen. Das Fehlen verbindlicher Grundsätze zur Nutzung gemeinsamer persistenter Identifikatoren und der Überprüfung der semantischen Validität bei der Erstellung von SWE-basierten Daten führt somit zu einer semantischen Inkompatibilität zwischen verschiedenen SWE-formatierten Datensätzen. Diese kann sich vor allem in Mehr- und Uneindeutigkeiten von gewählten Begriffen äußern, sodass Nutzer und Anwendungen durch eine fehlerhafte Interpretation dieser an falsche Datensätze gelangen, oder durch ein anderes Begriffsverständnis adäquate Daten nicht als solche erkennen. Ein Beispiel hierfür wäre die Wahl der unterschiedlichen englischsprachigen Begriffe „*sea surface temperature*“, repräsentiert durch z.B. `urn:[...]:sea_surface_temperature` bzw. `urn:[...]:sst`, und „*water temperature*“, repräsentiert durch z.B. `urn:[...]:water_temperature`, für das gleiche Phänomen der Oberflächenwassertemperatur. Ungenauigkeiten durch verschiedene Sprachen, wie z.B. die englischen Übersetzungen unterschiedlicher Bedeutung „*forest*“ und „*wood*“ für den deutschen Begriff „Wald“, verstärken diesen Effekt. Obwohl diese Inkompatibilität innerhalb von Forschungsprojekten und fachlichen Anwendergemeinden durch entsprechendes Fachwissen und interne Kommunikation auszugleichen ist, entscheidet sie auf einer größeren Skala über die grundsätzliche Verwertbarkeit von Sensordaten. Mehrwerte des zu betreibenden Aufwands für die Adaptierung der SWE-Standards, wie z.B. die Auffindung, ad hoc-Vermittlung und Integrierung verschiedener verteilter Datenquellen, werden dadurch relativiert.

Im Rahmen des SLEWS-Projekts richtete sich der Aufbau der verwendeten URNs nach dem für alle seine Standards vorgeschlagenen Codierungsschema im autoritären Namensraum des OGC (OGC, 2009c):

```
urn:ogc:{category.label}:{ResourceSpecificString}
```

Die entsprechende Codierung des Schemas mithilfe entsprechender hierarchisch aufgebauter Identifikatoren wurde bis heute nicht genau spezifiziert. Erste Richtlinien für die Codierung von Einzelobjekten sehen den Aufbau von URNs in der folgenden Form vor:

```
urn:ogc:def:objectType:authority:version:code
```

Unter Verwendung der Environmental Data Coding Specification (EDCS, ISO/IEC 18025) als Namensautorität für Umweltobjekte ergibt sich für Beobachtungs- und Messphänomene die Grundform:

```
urn:ogc:def:phenomenon:EDCS:2005:[...]
```

Unter Annahme des Projekts SLEWS als Namensautorität ergibt sich für Sensoren die Grundform:

```
urn:ogc:object:feature:Sensor:SLEWS:[...]
```

Nach Erfahrungen des Autors erfolgte die genaue Umsetzung von URNs nach diesem Richtschema in der Menge der bekannten SWE-basierten Projekte nur sehr uneinheitlich.

Neben Bemühungen der internen Arbeitsgruppen zur Suche einer Lösung dieser Probleme arbeitet das OGC eng mit anderen Organisationen (W3C, 2011) und fachspezifischen Arbeitsgruppen (z.B. MMI, 2007) zusammen. Verschiedene Ansätze existieren, um die Situation durch Konzepte des Semantic Web zum Aufbau eines Semantic Sensor Web zu verbessern. Hierbei kommen semantische Regeln und Funktionen wie Sacherschließung und Ableitung von Begriffen durch Nutzung von Technologien wie dem Resource Description Framework (RDF) und der Web Ontology Language (OWL) zum Einsatz. Weiterhin wichtig ist die Adaption von Prinzipien des Linked Data-Ansatzes (Bizer et al., 2009) und der Resource-Oriented Architecture (ROA, Fielding, 2010). Diese sind zur Umsetzung einer semantischen Vernetzung relevant, um entsprechend codierte Informationsressourcen miteinander zu verknüpfen und über einfach auflösbare HTTP-basierte Netzwerkaufrufe zugänglich und interpretierbar zu machen. Für das angestrebte Resultat bedarf es der Übersetzung von räumlichen Sensordaten und -modellen, bzw. deren semantische Beziehungen untereinander, in RDF/OWL-basierte Formate. Für OGC (Sensor Web) Dienststandards wird der Anschluss an semantische Technologien durch den Einsatz von Vermittlungsebenen in Form von Proxy-Anwendungen und REST-Schnittstellen (Representational State Transfer) erforscht (Janowicz et al., 2011). Ein Beispiel hierfür ist, dass Daten oder semantische Regeln statt über den HTTP-Aufruf einer Dienstoperation mit entsprechenden Parametern (z.B. *GetObservation*-Aufruf), über direkte individuelle Netzwerkadressen (z.B. [http://\[domain\]/sensors/\[phenomenon\]/\[...\]](http://[domain]/sensors/[phenomenon]/[...])) referenzier- und abfragbar sind. Eine entsprechende Übersetzung zwischen beiden Ebenen ist über die Formulierung und Anwendung von Filtern realisierbar.

Erste Modifikationen der SWE-Formatstandards bestehen in der Abwendung von URNs zugunsten von HTTP-basierten URIs (z.B. URLs) als Identifikatoren (OGC, 2010d). Entsprechende Änderungen werden beim Übergang der Versionen 1.0 auf 2.0 berücksichtigt. Trotz des andauernden Fehlens von verbindlich zu nutzenden kontrollierten Vokabularen und semantischen Verbindungsmechanismen, verspricht man sich durch die angedachte Vergabe von URLs eine Erleichterung im Umgang mit Identifikatoren. Eindeutige und auch bedingt persistente URLs sind einfach zu generieren und können durch Verlinkung auf Informationsressourcen (z.B. Metadattendokumente) Sensoren und Phänomene sowohl identifizieren als auch beschreiben. Weiterhin werden Bestrebungen zur Harmonisierung und Vereinheitlichungen von verwendeten Modellen sowohl innerhalb der SWE-Initiative, als auch innerhalb aller OGC-Standards vorangetrieben, um die zukünftige Integrierung von OGC-basierten Geodateninfrastrukturen in ein Semantic Geospatial Web bzw. Semantic Sensor Web zu erleichtern. Weitere vielversprechende Schritte, wie z.B. die bereits erwähnte Schaffung von Vorlagen (discovery profiles) für SensorML-Dokumente und ihre Integrierung in Kataloge, sollen die Sichtbarkeit von existierenden Sensorres-

sources erhöhen und dadurch eine gewisse de facto-Harmonisierung bei der Verwendung von Identifikatoren herbeiführen. Hierfür liegen weiterhin in Form von OGC-Diskussionsberichten Konzepte für zwei Verzeichnisdienste vor, das Sensor Observable Registry (SOR) (OGC, 2010e) und das Sensor Instance Registry (SIR) (OGC, 2010f).

SOR, zur Recherche und Verwaltung von Identifikatoren und Beschreibungen von Beobachtungsphänomenen, und SIR, zur Recherche und Verwaltung von Identifikatoren und Beschreibungen von Sensorsystemen, sollen einen Brückenschlag zwischen SWE-basierten Daten und Katalogdatensätzen bilden. Nutzer der Dienste sollen in die Lage versetzt werden, Sensoren und Beobachtungsphänomene anhand von Identifikatoren oder Beschreibungen auffindig zu machen und zur weiterführenden Recherche oder Erstellung von SensorML- bzw. O&M-Instanzen zu verwenden. Im Gegenzug ist auch das Hinzufügen von neuen Datensätzen von Nutzerseite, bzw. durch automatisiertes Abfragen (harvesting) von SWE-Diensten möglich. Gesammelte Informationen können zudem, unter Annahme einer standardisierten Transformationsregel zwischen den Formaten, auch in Kataloganwendungen übertragen werden. Dienstebasierte Webschnittstellen ermöglichen zudem eine gute Integrierbarkeit in externe Anwendungen. Zukunft und Fortbestehensform von SIR/SOR werden im Rahmen der Arbeiten der OGC SWE-Arbeitsgruppen diskutiert.

5.5.1. Nutzungs- und Verbesserungsvorschläge

Neben den genannten Lösungsansätzen stellen aus Sicht des Autors SIR/SOR bzw. die dadurch vertretenen Anwendungskonzepte ein adäquates und einfach umzusetzendes Mittel dar, um die semantische Harmonisierung von Identifikatoren im Rahmen der SWE-Initiative voranzutreiben. Das in Kapitel 5.3 beschriebene Feeder-/SWE Connector-Prinzip würde durch eine Einbindung von Diensten nach SIR/SOR-Vorbild stark profitieren. Dort beschriebene aufbauende Webanwendungen könnten Beschreibungen und Identifikatoren von Phänomenen und Sensoren so vereinfacht zugänglich machen, um durch eine entsprechende Führung Nutzer beim Formalisierungs- und Modellierungsvorgang von Sensordaten zu unterstützen. Weiterhin können sich entsprechende Ansätze bei der Konzeption von zukünftigen Methoden zur ad hoc-Orchestrierung von verteilten Datenquellen auf Anwendungsebene als nützlich erweisen (siehe Kapitel 6.6).

Wie auch von den Autoren der SIR/SOR-Diskussionsbeiträgen angesprochen, besteht ein Defizit der jetzigen Form in der fehlenden Unterstützung von tiefergehenden semantischen Mechanismen. Operationen zur Bestimmung von Beziehungen zwischen Phänomenen werden im SOR unterstützt, können aber nur als Generalisierung (z.B. Luftfeuchte), Spezialisierung (z.B. relative Luftfeuchte), und Gleichwertigkeit ausgedrückt werden. Grundsätzlich ist jedoch bei diesem Ansatz die Qualität der semantischen Zusammenhänge des Verzeichnisses nur so gut, wie die Beschaffenheit der ursprünglichen Inhalte aus denen es zusammengestellt ist. Während geführ-

te URIs im Idealfall bereits in Form von URLs auf aussagekräftige Objektbegriffe in Thesauri oder Ontologien hinweisen, unterliegt ihr Aufbau im Normalfall Mehr- und Uneindeutigkeiten, wie sie zuvor beschrieben sind. URIs unterliegen zwangsläufig den Sichtweisen und Sprachgebräuchen ihrer Urheber und müssen aus diesem Grund ganz offensichtlich näher in semantische Regelwerke eingegliedert werden.

Aus Sicht des Autors kann dies durch einfache Modifikationen des Konzepts erreicht werden. Wichtig ist nicht nur die Konstruktion von Identifikatoren für Sensoren und Phänomene in Form von Verweisen auf semantische Objekte (z.B. in einem Thesaurus), sondern vor allem gleichermaßen die Erfassung ihrer verschiedenen Anwendungsfälle. Beschreibende Angaben oder Suchbegriffe werden von Nutzern häufig unter der Verwendung sehr weit gefasster und unscharfer Begriffe, wie z.B. Hangrutschung oder Wasserverschmutzung, angegeben. Durch die Hinterlegung von unscharfen Beschreibungen solcher spezifischen Anwendungen und deren Verknüpfung über ein dahinterliegendes semantisches Regelwerk, kann so eine zusätzliche Ebene zur Vernetzung von Sensordaten geschaffen werden. Entsprechende *community tags* sollten beliebig oft pro Datensatz des SIR/SOR anbringbar und für alle Nutzer frei editierbar sein. Angelehnt an das Prinzip des Crowdsourcing (Wikipedia, 2012a) kann so der Einsatz von *community tags* zur Qualitätsverdichtung des entsprechenden Datensatzes und seiner semantischen Eingliederung führen. *Community tags* sollten dabei zur Vermeidung von Ungenauigkeiten nicht durch Begriffe (wie z.B. Hangrutsch), sondern durch URIs referenzierend auf übergeordnete Konzeptklassen in einem Thesaurus umfasst werden (vgl. z.B. Klasse ‚concept‘ der formalen Sprache Simple Knowledge Organisation System (SKOS) des W3C, siehe W3C, 2009). Neben der Eingliederung der hinterlegten Sensoren- und Phänomenbeschreibungen des SIR/SOR an einen Thesaurus zur eindeutigen Identifizierung und semantischen Vernetzung, wäre somit auch die Rückrichtung bei einer Recherche denkbar, die von Objekten des Thesaurus auf die entsprechenden SIR/SOR-Einträge verweist.

6. Nahtstelle zur Frühwarnung: Informationsverarbeitung

Die bisher beschriebene Geodateninfrastruktur bildet die Grundlage für die darauf aufbauende Anwendungsebene und für alle darin enthaltenen Prozesse des Datenzugriffs, der Analyse, Präsentation und Benachrichtigung. Durch entsprechende Informationsvermittlung an (Fach-)Anwender, Entscheidungsträger und Einsatzkräfte wird unter Bildung von unterschiedlichen Kommunikationsprofilen eine Frühwarnkette aufgebaut. Entsprechend der Anforderungen der Anwenderbefragung (siehe Kapitel 4.1.3) soll gezeigt werden, wie spezifische hangrutschungsbezogene Analyseprozesse an die Schnittstellen der Geodateninfrastruktur angegliedert und für die Umsetzung von Informationsprodukten zur Realisierung der Frühwarnkette verwendet werden können.

6.1. Benachrichtigung

Ein wesentlicher Aspekt der Funktionen eines Monitoring- und Frühwarnsystems liegt in der Umsetzung einer bidirektionalen und vor allem asynchronen Kommunikation zwischen Nutzer und Informationssystem. Da die Versorgung mit Informationen aus der Datenhaltung nicht nur auf Veranlassung des Nutzers geschehen darf (*Pull*-Kommunikation), sondern auch ohne permanente Aufsicht von Seiten des Informationssystems ausgehen muss (*Push*-Kommunikation), müssen entsprechende Mechanismen für situationsbedingte Benachrichtigungen umgesetzt werden. Im Rahmen der Forschungsarbeiten und Vorgaben der Anwenderbefragung im Projekt SLEWS (SLEWS, 2011) ergeben sich drei abgestufte Kommunikationsmodi (siehe Abbildung 28), die sich anhand von Kommunikationsrichtung, Dringlichkeit und Anwenderzuständigkeit unterscheiden:

- Der Modus „Information“ umfasst die regelmäßige Überwachung der Messdatenentwicklung durch die wissenschaftliche Fachstelle mithilfe des Informationssystems ohne unmittelbare Bedrohung oder Handlungsbedarf. Die Kommunikation zwischen Anwender und Informationssystem verläuft auf Veranlassung des Anwenders hin (*Pull*) synchron.
- Der Modus „Warnung“ umfasst eine situationsbedingte Benachrichtigung der wissenschaftlichen Fachstelle aufgrund einer zuvor erstellten Bedingung der Messdatenentwicklung. Die Aufmerksamkeit eines Anwenders und seine Interaktion mit dem Informationssystem ist gefordert, um die Situation und die möglicherweise unmittelbare Bedrohung einschätzen und etwaige Handlungsmaßnahmen einleiten zu können. Die Kommunikation zwischen Anwender und Informationssystem verläuft auf Veranlassung des Informationssystems (*Push*) zunächst asynchron, wechselt aber durch Interaktion mit dem Nutzer wieder zur Synchronizität.

- Der Modus „Alarm“ umfasst eine situationsbedingte Benachrichtigung der wissenschaftlichen Fachstelle und einer entsprechenden Einsatzzentrale aufgrund einer zuvor erstellten Bedingung der Messdatenentwicklung, die mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit eine unmittelbare Bedrohung und sofortigen Handlungsbedarf impliziert. Aufgrund des zeitkritischen Charakters des möglichen Zwischenfalls ist eine vorgelagerte Begutachtung der Situation durch die wissenschaftliche Fachstelle ohne Verständigung von Einsatzkräften nicht vertretbar. Das Vorliegen eines Fehlalarms wird in Kauf genommen. Die Kommunikation zwischen Anwender und Informationssystem verläuft auf Veranlassung des Informationssystems (*Push*) asynchron.

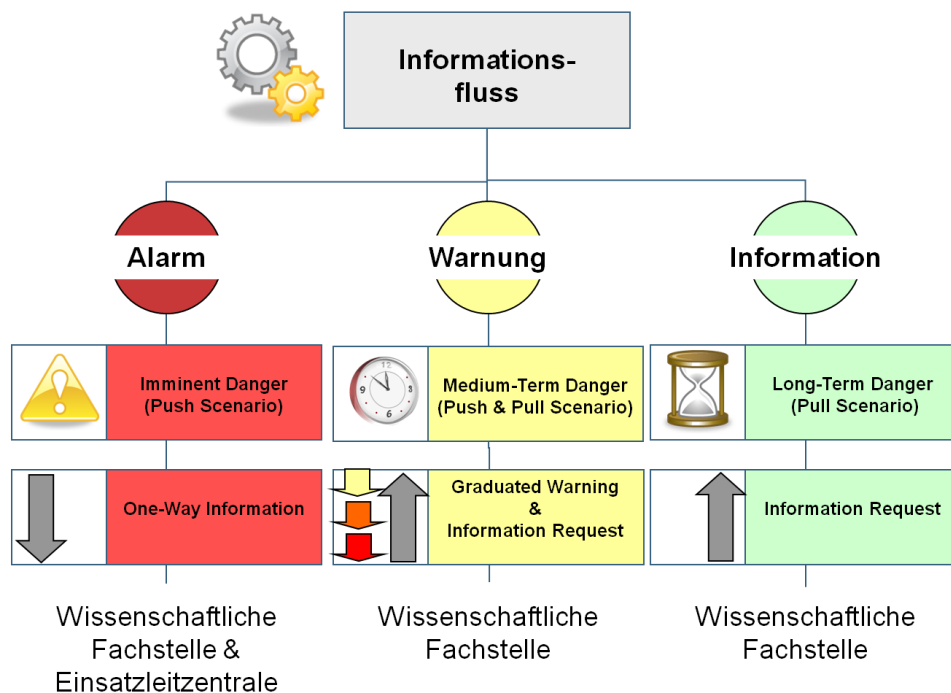


Abbildung 28: Abgestufte Kommunikationsmodi zwischen Anwender und Informationssystem (SLEWS, 2011)

Der Bedarf an Dienstestandards für ereignisbasierte Benachrichtigungsmechanismen zeigt sich in den Arbeiten des OGC aber auch anderer Standardisierungsorganisationen (OASIS). Im Rahmen verschiedener Arbeitsgruppen und Webservices Testbeds des OGC wird an Konzepten zur Umsetzung von ereignisbasierten Geodateninfrastrukturen durch die Einbindung von publish/subscribe-Funktionalität geforscht (OGC, 2011b). Der Sensorbereich steht dabei im besonderen Fokus. Im Rahmen der SWE-Initiative wurden dazu verschiedene Dienstespezifikationen (Sensor Alert Service, Web Notification Service, Sensor Event Service) entwickelt, die u.a. wegen fehlender Harmonisierung mit anerkannten externen Standards (z.B. OASIS WS-N, siehe OASIS, 2006b) nie endgültig als Version 1.0 verabschiedet werden konnten. In laufenden Implementierungen kommen diese Dienste dennoch als de facto-Standards vielfach zum Einsatz und gelten als Basis zukünftiger Standardumsetzungen. Im Folgenden soll gezeigt werden, wie der Sensor Alert Service (SAS) zur Umsetzung der aufgeführten Kommunikationsmodi im Projekt

SLEWS verwendet werden kann. Weiterhin soll gezeigt werden, wie ereignisbasierte Benachrichtigungs- und Kommunikationsmechanismen auch für die Automatisierung von Prozessabläufen, wie z.B. für eine grundlegende Plausibilitätsprüfung zur aktiven Vermeidung von Fehlalarmen, genutzt werden können.

6.1.1. Implementierung des Sensor Alert Service

Einzig verfügbare Umsetzungen der SAS-Spezifikation(en) liegen in Form von *Free and Open Source Software* (FOSS) der 52° North-Initiative vor. Zur Umsetzung des Prototyps kam der *52° North Sensor Alert Service* in der Version 1.0 zum Einsatz. Hierbei handelt es sich um ein Java-basiertes Webservice-Paket, welches zur Ausführung eine *Java Runtime Environment/Java Development Kit* ab Version 1.5, *Apache Jakarta Tomcat* ab Version 5.5 und das Datenbanksystem *PostgreSQL* ab Version 8.1.3 zusammen mit der räumlichen Erweiterung *PostGIS* ab Version 1.1.1 benötigt. Zur Umsetzung der sich wiederholenden Kommunikation wird weiterhin ein XMPP-Server benötigt, der mit der FOSS-Implementation *ejabberd* in der Version 2.1.0 zum Einsatz kam. Der Umfang der Schnittstellenoperationen richtet sich in der SAS-Umsetzung nach dem OGC-Spezifikationsdokument OGC 06-028r3 und setzt somit nur die grundlegenden Operationen des Dienstkonzepts zusammen mit den Vergleichsoperatoren (nach DIN 1302) „gleich“ (=), „ungleich“ (≠), „größer als“ (>) und „kleiner als“ (<) um.

6.1.2. Einbindung des Sensor Alert Service

Aus Sicht der Dienstspezifikation handelt es sich bei einer Sensordatenquelle um einen abstrakten Knotenpunkt, der über zwei verschiedene Kommunikationsprotokolle mit dem SAS in Verbindung steht. Einmalige Vorgänge wie Registrierungen von Sensoren (*Advertise*-) und Nutzern (*Subscribe*-) am Dienst sowie die obligatorische *GetCapabilities*-Operation werden über das HTTP-Protokoll abgehandelt, während zur Übermittlung von sich wiederholenden Nachrichten vom Sensor (*Publish*) und zum Nutzer (*Alarm*) das XMPP-Protokoll (Extensible Messaging and Presence Protocol) zum Einsatz kommt. Nutzer und Sensor(en) werden über einen sogenannten *Multi User Chat* (MUC) miteinander verbunden. Zur Angliederung des SAS an die bisher beschriebene Geodateninfrastruktur müssen verschiedene Schritte durchgeführt werden. Als erstes müssen alle entsprechenden Sensorquellen am SAS registriert werden. Der Begriff der Sensorquelle muss in diesem Zusammenhang unter Berücksichtigung der beschriebenen Formalisierungs- und Ummodellierungsvorgänge gesehen werden und kann wie ein „Datenkanal“ mit Messdaten jeweils eines *phenomenon* des SOS (z.B. `urn:ogc:def:phenomenon:EDCS:2005:acceleration_x`) gesehen werden. Die Codierung einer *Advertise*-Anfrage ist in Listing 13 zu sehen. Hierbei findet die entsprechende Referenzierung zum Datenbestand des SOS anhand von Positionsangabe bzw. Bezeichnung der Messpunkt-/Knotenidentifikation und *phenomenon*-Identifikator statt. Die Antwort des SAS enthält neben der

Quittierungs-ID (*PublicationID*) u.a. einen URI in der Form `xmpp://sensor[PublicationID]@conference.[domain]`, der zum entsprechenden MUC-Kanal weist, der vom XMPP-Server zur Verbindung mit dem Knotenpunkt eingerichtet wurde.

```
<Advertise xmlns="http://www.opengis.net/sas" [...] service="SAS" version="1.0.0">
  <FeatureOfInterest>
    <Name>01</Name>
    <Description>
      Property #QuantityProperty measured on
      SLEWS mote #FOI Name at sample point #FOI Name
    </Description>
  </FeatureOfInterest>
  <OperationArea>
    <swe:GeoLocation>
      <swe:longitude>
        <swe:Quantity>50.773329</swe:Quantity>
      </swe:longitude>
      <swe:latitude>
        <swe:Quantity>6.075389</swe:Quantity>
      </swe:latitude>
      <swe:altitude>
        <swe:Quantity>173</swe:Quantity>
      </swe:altitude>
    </swe:GeoLocation>
  </OperationArea>
  <AlertMessageStructure>
    <QuantityProperty>
      <Content definition=
        "urn:ogc:def:phenomenon:EDCS:2005:acceleration_x"
        uom="g" min="-2" max="+2"/>
    </QuantityProperty>
  </AlertMessageStructure>
  <AlertFrequency>0</AlertFrequency>
  <DesiredPublicationExpiration>never</DesiredPublicationExpiration >
</Advertise>
```

Listing 13: Informationscodierung der *Advertise*-Operation zur Registrierung eines Sensors bzw. Datenkanals am SAS

Da bei der Umsetzung für das Projekt SLEWS die Sensorknoten sowohl aus den zuvor beschriebenen Gründen der Ressourcenlimitierung wie auch der angeschlossenen Modellierung der Datenhaltung nicht selbst mit SAS und XMPP-Server kommunizieren, musste diese Funktion durch eine stellvertretende Vermittlungsanwendung umgesetzt werden. Die HTTP-basierten *Advertise*-Operationen konnten aufgrund der überschaubaren Menge von Sensorknoten (eine Operation pro Sensorknoten und *phenomenon*) im prototypischen Sensornetz manuell übernommen werden, sollten jedoch für umfangreichere Produktsysteme weitestgehend automatisiert durchgeführt werden. Zur Übermittlung der regelmäßigen XMPP-Nachrichten mit Messdaten an den ejabbered-Server wurde die in Kapitel 5.3.3 beschriebene SWE Connector-Anwendung zur Formalisierung und Übermittlung der Rohdaten entsprechend angepasst. Durch die in umfassender Anzahl zur Verfügung stehenden XMPP-Bibliotheken für verschiedenste Programmiersprachen (wie z.B. C) konnte die Anwendung problemlos erweitert werden. Resultierende XMPP Client-Prozeduren nutzen die in den jeweiligen Antworten auf *Advertise*-Operationen enthaltenen URIs, um sich mit den entsprechenden MUCs des ejabbered-Server zu verbinden. Pro aktuellem Messdatenpaket wird, im Anschluss an die in Kapitel 5.1.2 beschriebene Prozessierung, jeweils ein Messwert pro *phenomenon* und Sensorknoten sich wiederho-

lend über die Operationen *Publish* übermittelt. Für ein Datenpaket des in Listing 13 gezeigten Beispiels lautet die Codierung einer *Publish*-Operation entsprechend der Syntax

```
<Breitengrad Längengrad Höhe Messzeitpunkt Gültigkeitsdauer Messwert>
```

wie folgt:

```
<50.773329 6.075389 173 2008-10-06T14:33:51 0 0.5>
```

Nach der initialen Konfiguration durch die Verbindung aller „Datenkanäle“ steht der SAS für das Abonnieren von Benachrichtigungen für Nutzer bereit. Nach der Abfrage und Recherche des *GetCapabilities*-Dokuments können Nutzer unter Angabe von *phenomenon*-Identifikator, Positionsangabe bzw. Bezeichnung der Messpunkt-/Knotenidentifikation und einer Filterregel bezüglich des Messwerts situationsbedingte Benachrichtigungen abonnieren. Eine beispielhafte *Subscribe*-Anfrage ist in Listing 14 zu sehen. Die Antwort des SAS enthält neben der Quittierungs-ID (*SubscriptionID*) u.a. einen URI in der Form `xmpp://subscr[SubscriptionID]@conference.[domain]` der zum entsprechenden MUC-Kanal weist, der vom XMPP-Server zur Verbindung mit dem Nutzer eingerichtet wurde. Der eigentliche Vorgang der ereignisbasierten Benachrichtigung wird durch die Vermittlung von Nachrichten zwischen Sensorknoten-MUC und Nutzer-MUC unter Berücksichtigung der jeweiligen Filterregeln durchgeführt.

```
<Subscribe service="SAS" [...]>
  <ResultFilter ObservedPropertyDefinition=
    "urn:ogc:def:phenomenon:EDCS:2005:acceleration_x">
    <isGreaterThan>0.5</isGreaterThan>
  </ResultFilter>
<FeatureOfInterestName>01</FeatureOfInterestName >
</Subscribe>
```

Listing 14: Informationscodierung der *Subscribe*-Operation zur Registrierung eines Nutzers am SAS

Der Kommunikationsablauf zwischen Anwendungsebene bzw. Sensornetz und SAS am Beispiel des SLEWS-Informationssystems ist in Abbildung 29 illustriert. Erste grundlegende Tests des Empfangs auf Nutzerseite wurden unter der Verwendung von verbreiteten XMPP-Clients, wie Pidgin für Linux/Windows im Desktop-Bereich, Google Talk für Android im Mobilbereich und browserbasierten Webanwendungen, durchgeführt. Trotz der theoretischen Erhöhung des zwischen Sensor- und Dienstebene zu übertragenden Datenvolumens und dem daraus entstehenden Mehrverbrauch von Bandbreite und Prozessierungsleistung, machte sich der zusätzliche Ressourcenaufwand nicht wesentlich bemerkbar. Benachrichtigungen wurden im Laufe der Testphase zu jedem Zeitpunkt echtzeitnah zwischen Sensorebene und Client-Anwendungen übermittelt.

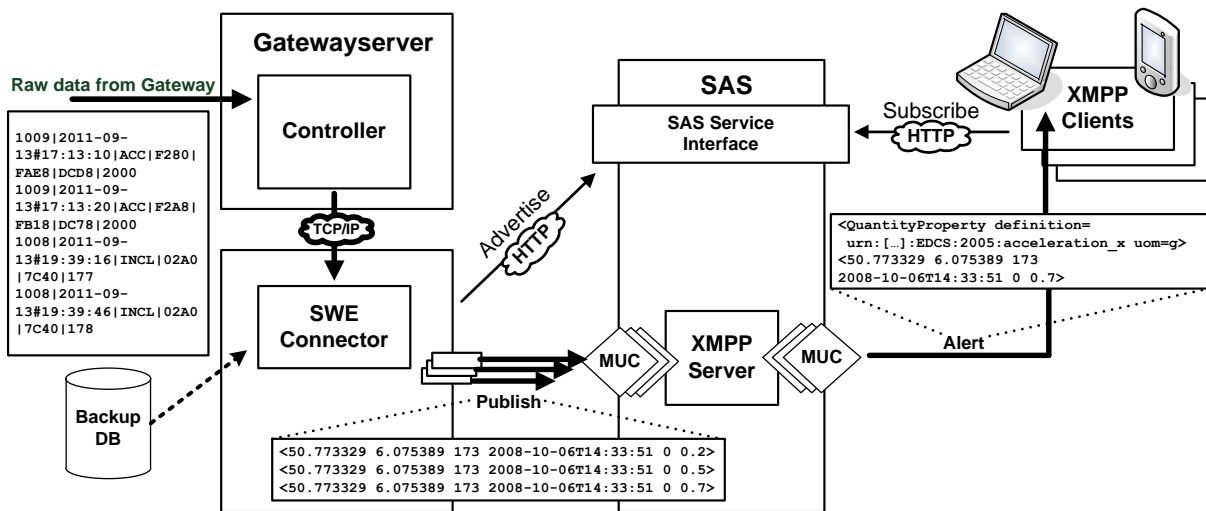


Abbildung 29: Kommunikationsablauf zwischen Anwendungsebene bzw. Sensornetz und SAS am Beispiel des SLEWS-Informationssystems

Aus Sicht des Autors stellt XMPP-basierte Kommunikation aufgrund positiver Eigenschaften wie guter Performanz und hoher Flexibilität eine gute Grundlage für die Umsetzungen von situationsbedingten und z.T. zeitkritischen Benachrichtigungen dar. Trotz der fehlenden Verabschiedung des SAS als Standard stellt die eng verbundene Nutzung von XMPP zudem eine naheliegende Wahl zur Unterstützung von de facto-Standards dar. XMPP bildet die Grundlage für eine breite Anzahl von Instant Messaging (IM)-Anwendungen (z.B. Jabber, GoogleTalk, Facebook etc.), wodurch Implementierungen verschiedenster stationärer (Desktop PC) und mobiler (Smartphone, PDA) Clientanwendungen sowie Programmbibliotheken in großer Menge zur Verfügung stehen. Interoperabilität zwischen den genannten wie auch zu anderen (proprietären) IM-Anwendungen (wie z.B. Yahoo, MSN, ICQ etc.) ist entweder gegeben oder durch den Einsatz sogenannter *Transports* umsetzbar. Auch hardwarenahe Formate wie das Kommunikationsprotokoll der FOSS Physical-Computing-Plattform Arduino (Arduino, 2012), zur Programmierung und Steuerung von Sensoren, ist eng an XMPP angelehnt. Weiterhin existieren ausgereifte und z.T. frei nutzbare Produkte (Gateways) zur Portierung von XMPP-Formaten in weitere Kommunikationsprotokolle wie Email (z.B. Google Mail), Short Message Service (SMS, z.B. webtext.com) und Really Simple Syndication (RSS, über Transport). Weiterhin demonstrieren verschiedene Arbeiten die Vermittlung zwischen XMPP und anwendungsspezifischen Formaten, wie dem im Frühwarn- und Alarmbereich sehr verbreiteten Common Alerting Protocol (Saint-Andre & Fletcher B., 2004).

Auch im Rahmen der SWE-Initiative wurde ein Protokollwandler in Form des Web Notification Service (WNS) spezifiziert, der zur Überbrückung von Kommunikationskanälen (last-mile-mode) dienen soll. Das Zusammenspiel zwischen SAS und WNS ist dabei auf Spezifikationsebene abgestimmt, so dass ein Nutzer bereits bei der Registrierung am SAS über die *Subscribe*-Operation die Umleitung über einen WNS vermerken kann. Es ist zu beachten, dass der WNS ebenfalls nicht als Standard verabschiedet wurde, so dass der Mehrwert einer Umsetzung abgewogen und beschriebene „off-the-shelf“-Angebote im XMPP-Umfeld als Alternativen betrachtet

werden müssen. Als Argument für die Verwendung einer WNS-Implementation würden, neben möglichen Ansprüchen an Verfügbarkeitsgewährleistung und Datensicherheit, besonders Anforderungen für individuelle Formatumwandlungen gelten, die noch nicht als fertiges Produkt existieren. Hierbei bietet die vorliegende Softwareumsetzung der WNS-Spezifikation (von 52° North) eine naheliegende Möglichkeit für Eigenentwicklungen. Für Testimplementationen im Rahmen des Projekts SLEWS zeigten sich genannte existierende XMPP-basierte Produkte vorerst als ausreichend, um zeitnahe Einbindungen von Nachrichten des SAS auf verschiedenen Endgeräten (Desktop/Smartphone/Web) umzusetzen. Auf lange Sicht ist jedoch die Nutzung von verabschiedeten und international anerkannten Standards, wie in laufenden Arbeiten des OGC durch Adaption der OASIS WS-N angestrebt, zu bevorzugen.

Gleiche Überlegungen wie für den WNS gelten grundsätzlich auch für Nutzung der SAS-Spezifikation. Trotz fehlender Standardisierung war eine Nutzung in der Projektphase aufgrund der Verfügbarkeit einer Softwareumsetzung und Unterstützung beschriebener de facto-Standards einer Eigenentwicklung vorzuziehen. Weiterhin ist die Begrenzung durch die sehr limitierten Filterkapazitäten zu beachten, die in der Erweiterung in Form des Sensor Event Service (SES) wesentlich verbessert wurden. Ein Austausch des verwendeten SAS durch einen SES ist zwar grundsätzlich naheliegend, war im Rahmen des Projekts SLEWS u.a. wegen der ebenfalls ausstehenden Standardisierung aber nicht unmittelbar relevant. Grundsätzlich soll, wie im Folgenden gezeigt, die grundsätzliche Verknüpfung von Analyseanwendungen mit Funktionen der ereignisbasierten Benachrichtigung diskutiert werden. Mit Berücksichtigung entsprechender spezifischer Anpassungen kann dabei aber jedes (zukünftige) System zum Einsatz kommen, das ereignisbasierte *Push*-Kommunikation umsetzt. Umfangreiche Filterkapazitäten werden im SLEWS-Projekt laut Anwenderanforderungen zudem im festen Aufgabenbereich von spezifischen Fachanwendungen auf Anwendungsebene gesehen.

Das folgende Kapitel diskutiert die Möglichkeiten der Umsetzungen des zuvor beschriebenen abgestuften Warnkonzepts mithilfe der zu Verfügung stehenden Dienste der Geodateninfrastruktur und anwendungsspezifischen Analysemethoden.

6.2. Umsetzung des abgestuften Warnkonzepts der Frühwarnkette

Um qualifizierte Aussagen über mögliche hangrutschungsbezogene Ereignisse treffen zu können, ist die Analyse der zur Verfügung stehenden Messdaten erforderlich. Messdaten werden benutzt, um auf Eigenschaften des durch sie repräsentierten Beobachtungsobjekts, in diesem Fall einen Punkt X/Y der Hangoberfläche, schließen zu können. Die Analyse dieser Eigenschaft(en) soll zu einer Prozessbewertung verwendet werden, die wiederum die Grundlage für Rückschlüsse liefert (siehe auch Sensor-/Datenfusion in Kapitel 4.2). Daraus abgeleitete Aussagen müssen zur Benachrichtigung von Nutzern nach den zuvor festgelegten Kommunikationsmodi (Warnung,

Alarm) führen. Im Folgenden soll ein Konzept für eine entsprechende Frühwarnkette unter Verwendung der Dienste der Geodateninfrastruktur präsentiert werden. Im Rahmen der Arbeiten und Anwenderbefragung im Projekt SLEWS wurde der Bedarf nach zwei Analyseanwendungen identifiziert, die im Folgenden als Anwendung „Bewegung“ und Anwendung „Hangbewegung“ bezeichnet werden sollen.

Die Anwendung „Bewegung“ umfasst dabei eine Plausibilitätsprüfung, mit der, unter Verwendung von Mechanismen der Sensorfusion, Messausschläge der Sensordetektoren als Bewegungsereignis des Untergrunds verifiziert oder falsifiziert werden sollen. Die Anwendung „Hangbewegung“ umfasst die Bewertung dieser übernommenen Bewegungsereignisse im Beobachtungsgebiet bezüglich einer möglichen Hangrutschung unter Verwendung spezifischer Analysemethoden und zugrunde liegender Prozessmodelle (vgl. Brooks et al., 2004, Breunig et al., 2009). Es ist hierbei wichtig zu beachten, dass genaue Anforderungen, Leistungen und Umsetzungsdetails dieser Analyseanwendungen weder im Rahmen des Projekts ermittelt wurden, noch im Rahmen dieser Arbeit entwickelt werden sollen. Maßgeblich soll ihre Integration in das SLEWS-Informationssystem in Form von externen Anwendungen betrachtet werden, wobei grundlegende Funktionsweisen ohne Anspruch auf Vollständigkeit vorausgesetzt werden. Für das präsentierte Konzept wird für die Analyseanwendungen festgelegt, dass sie neben der internen Anwendungslogik über HTTP- und XMPP-Schnittstellen verfügen, um mit SOS und SAS der Diensteebene sowohl zu Zwecken der Datenabfrage wie auch zu Zwecken der Dateneintragung kommunizieren können (Ebene 1-3, siehe Abbildung 30). Nachrichten- und Messdaten liegen entsprechend O&M- bzw. XMPP-formatiert vor und können aufgrund der für XML typischen Semistrukturierung effizient geparkt und verarbeitet werden. Zu einer Verbesserung der Veranschaulichung des Konzepts wird davon ausgegangen, dass verschiedene SOS- und SAS-Instanzen auf den gezeigten Ebenen zum Einsatz kommen, welche jedoch, je nach Systemanforderungen, auch zu insgesamt einer Instanz zusammengefasst werden könnten.

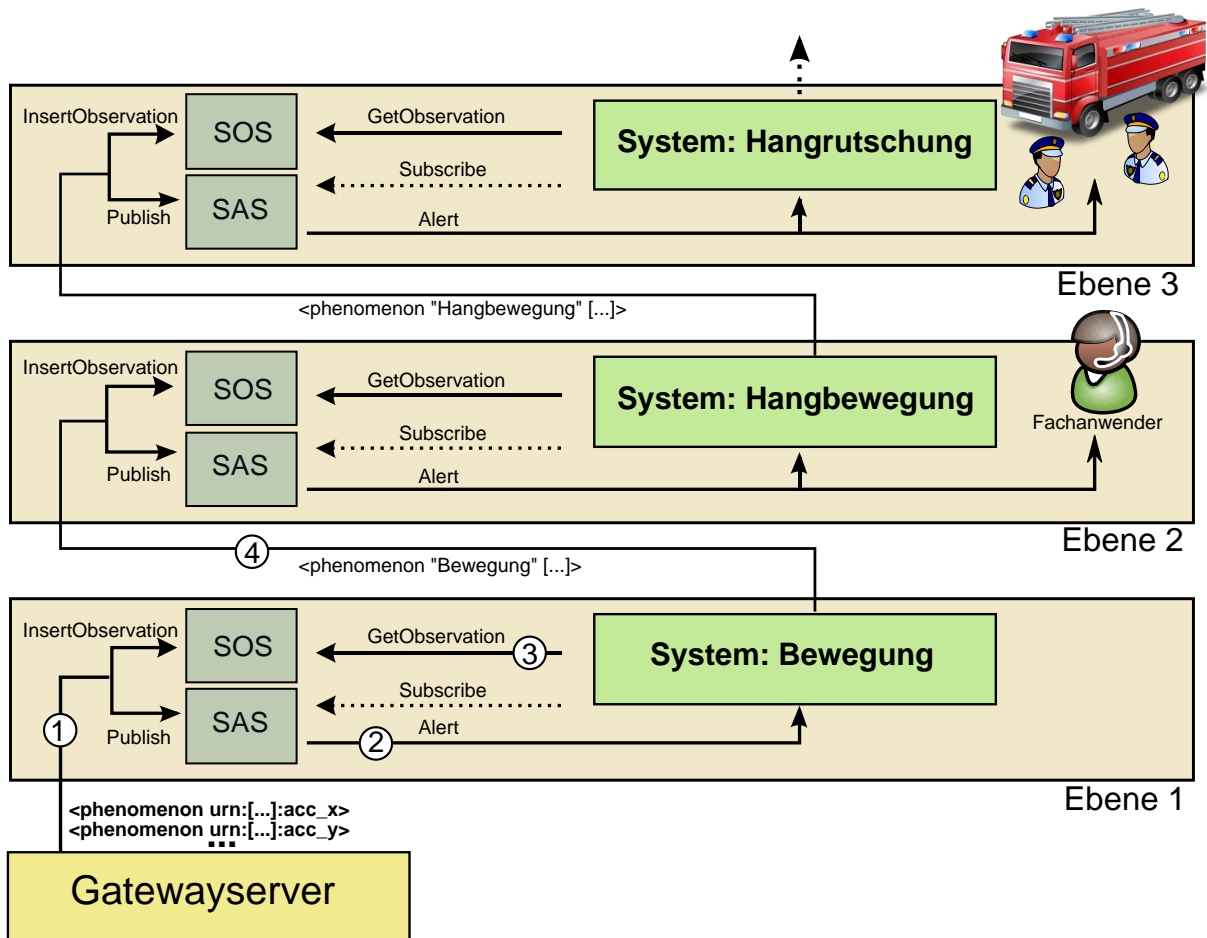


Abbildung 30: Einbezug von Fachanwendungen zur Bewegungs-/Hangrutschungsanalyse in das SLEWS-Informationssystem

Wie in Kapitel 5.3.3 und 6.1.2 beschrieben werden Messdaten vom Gatewayserver des Sensornetzes an den SOS und SAS vermittelt (Punkt 1). Die Anwendung „Bewegung“ ist in der Lage, die Datenhaltung des SOS auf Ebene 1 abzufragen, der die Messdaten des SLEWS-Sensornetzes nach Sensorknoten organisierten *offerings* anbietet (siehe hierzu auch Kapitel 5.4.2). Weiterhin ist die Anwendung ein Abonnent aller Knotenpunkte (registriert per *Subscribe*-Operationen, siehe hierzu auch Kapitel 6.1.2), deren „Datenkanäle“ zuvor entsprechend am SAS der Ebene registriert wurden (per *Advertise*-Operationen) und die aktuelle Messwerte an ihn übertragen (per Operation *Publish*). Die zugehörigen Startparameter der Filterregeln wurden zuvor z.B. zwischen Systembetreiber und wissenschaftlicher Fachstelle durch Festlegung bestimmter relevanter Schwellwerte abgestimmt. Im Falle der Überschreitung eines Schwellwerts wird eine *Alert*-Nachricht an die Anwendung „Bewegung“ übermittelt (Punkt 2). Durch die in der Nachricht enthaltenden räumlichen Angaben zum Beobachtungspunkt kann die Anwendung automatisiert überprüfen, ob parallel weitere *Alert*-Nachrichten anderer Phänomene eingegangen sind und/oder den zugehörigen Sensorknoten bzw. seine ihm zugeordnete *offering* ermitteln und Messdaten zusammen mit der Angabe des fraglichen Messzeitpunkts vom SOS abfragen (per Operation *GetObservation*, Punkt 3). Durch die so zur Verfügung stehenden Mes-

sungen aller weiteren Detektoren des Sensorknotens kann durch die interne Anwendungslogik ermittelt werden, ob ein zusammenhängender paralleler Messausschlag (von z.B. Neigung und Beschleunigung) vorliegt und somit auf ein relevantes Bewegungsereignis geschlossen werden kann, oder ob es sich um einen fehlerbedingten Ausreißer oder Schwankungen innerhalb normaler Ganglinien handelt, wonach die gemeldete Schwellwertüberschreitung ausgeschlossen werden kann. Anhand dieses Rückschlusses könnte die Anwendung „Bewegung“ zudem in die Lage versetzt werden, die Parameter der im SAS hinterlegten Filterregeln autonom anzupassen. Hierzu kann das bestehende Abonnement am SAS optional beendet (per Operation *CancelSubscription*) und ein neues (per Operation *Subscribe*) mit der anschließenden Verbindung zum neuen MUC des XMPP-Servers angestoßen werden. Die so umgesetzte Plausibilitätsüberprüfung ist somit in der Lage, relevante Bewegungsereignisse von Fehlmessungen oder gängigen Schwankungen zu unterscheiden und sich dynamisch durch Anpassung der Schwellwerte diesen gegenüber zu regulieren bzw. scharf/unscharf zu stellen.

Im Falle eines relevanten Bewegungsereignisses müssen die vorliegenden Messdaten an die Anwendungsanalyse „Hangbewegung“ (Ebene 2) weitergereicht werden, um die vorliegende Situation weiter beurteilen zu können. Hierzu wird im Rahmen des Konzepts ein synthetisches Beobachtungsphänomen „Bewegung“ vorgesehen, das aus den Analyseergebnissen der Anwendung „Bewegung“ entsteht. Basierend auf ursprünglich vorliegenden Messdaten und der entsprechenden Anwendungslogik wird eine Beobachtung dieses neuen Phänomens so geformt, dass es, neben Position, Sensorknoten und Messzeitpunkt, bewertende Parameter über die Charakteristika des Bewegungsereignisses (z.B. Intensität, relative Richtung) enthält. Parameterwerte könnten dabei sowohl Zahlenwerte wie auch sprachliche Begriffe enthalten. Die Anwendung „Bewegung“ nimmt so die Rolle eines virtuellen Sensors ein und übermittelt die Messung jedes neuen Ereignisses „Bewegung“ sowohl an eine entsprechend konfigurierte SOS-Instanz (O&M-formatiert per Operation *InsertObservation*) wie auch an eine SAS-Instanz (per Operation *Publish*) der Ebene 2 (Punkt 4). Analog zu Ebene 1 und Analyseanwendung „Bewegung“ ist auch die Anwendung „Hangbewegung“ auf Ebene 2 Abonnent aller Knotenpunkte des entsprechenden SAS. Durch entsprechend gesetzte Filterregeln sollen Messungseingänge „Bewegung“ zu einer *Alert*-Nachricht an die Anwendung führen. Weiterhin muss, entsprechend der Anforderungen des Kommunikationsprofils „Warnung“, parallel dazu die Benachrichtigung eines Nutzers der wissenschaftlichen Fachstelle angestoßen werden. Unter Festlegung einer Filterregel, die die Überschreitung eines gewissen Schwellwertes des Phänomens „Bewegung“ an einem entsprechenden Beobachtungspunkt umfasst, erfolgt die Benachrichtigung der zuvor registrierten Anwender. Alle bis zu diesem Punkt getroffenen Entscheidungsabfolgen sind in Abbildung 31 verdeutlicht. Unter Einsatz fach- und ortsspezifischen Wissens kann der Anwender beispielsweise eine oder mehrere eintreffende Nachrichten interpretieren, bewerten und gegebenenfalls unter Zuhilfenahme der Analyseanwendung „Hangbewegung“ und aller bisher über die SOS zur Verfügung

stehenden Daten weitergehend untersuchen. Durch die in den Nachrichten enthaltenden Angaben zu Beobachtungspunkt und Messzeit kann ein persistenter Zusammenhang der Messdaten der SOS-Instanzen gewährleistet werden.

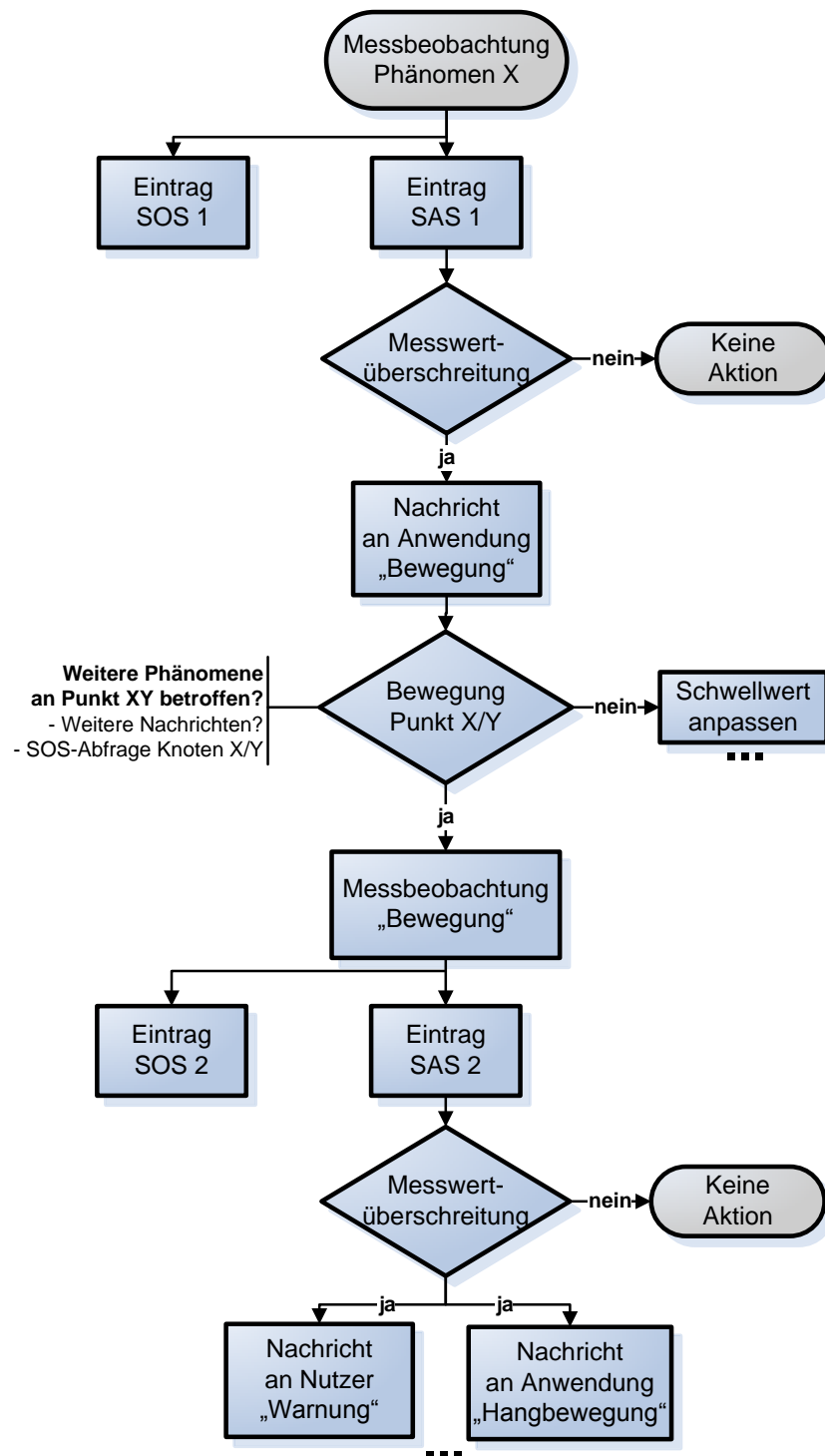


Abbildung 31: Entscheidungsdiagramm der Plausibilitätsprüfung und Erkennung eines Bewegungseignisses durch die Anwendung „Bewegung“

Weiterführende Aufgabe der Analyseanwendung „Hangbewegung“ ist die anknüpfende Untersuchung der entgegengenommenen Messungen des Phänomens „Bewegung“ unter Aufsicht des Fachanwenders. Aufgrund von zugrunde liegenden spe-

zialisierten Prozess- und Hangmodellen kann beispielsweise anhand von statistischen und räumlichen Methoden untersucht werden, ob es sich bei den Ereignissen um lokal isolierte Vorkommen (z.B. Steinschlag gegen einen Sensorknoten), erkennbare Muster von Fremdeinwirkungen (anthropogene Einflüsse, Flora und Fauna) oder um tatsächliche großflächige Hangrutschungsprozesse handelt. Hierzu können automatisiert weitere Daten benachbarter Sensorknoten abgerufen und zur Vervollständigung des Bildes einbezogen werden. Analog zu den vorangegangenen Beispielen kann die Analyseanwendung „Hangbewegung“ ebenfalls wieder als virtueller Sensor für ein weiteres synthetisches Phänomen „Hangbewegung“ fungieren, das entsprechend der Ergebnisse der Analyseanwendung bewertende Parameter der Wahrscheinlichkeit einer Bewegung des Hanges ausdrückt. Parameterwerte sollten hierbei klare Aussagen umfassen und z.B. definierte Alarmstufen angelehnt an ein Ampelsystem anbieten. Analog zu den bisherigen Ebenen werden Messungen des Phänomens „Hangbewegung“ an SOS- und SAS-Instanzen der Ebene 3 vermittelt, wobei Anwender der wissenschaftlichen Fachstelle und Einsatzzentrale, entsprechend des Kommunikationsprofils „Alarm“ Abonnenten und Pflichtempfänger von *Alert*-Nachrichten sind, die auf jedes Auftreten eines Messwertes des Phänomens „Hangbewegung“ erfolgen müssen. Die Anwendung „Hangrutschung“, die an dieser Stelle nur noch exemplarisch angerissen werden soll, kann weiterführende Prozessierungsressourcen bieten und als Grundlage für weitere Informationsebenen, z.B. für Einsatzkoordinierung oder Gefahrenmanagement, zur Verfügung stehen.

Das hier gezeigte Systemkonzept einer Frühwarnkette setzt die geforderten Kommunikationsmodi eines abgestuften Warnkonzepts vollständig um. Durch den semiautomatisierten Charakter werden auf Fehlmessungen basierte Benachrichtigungen durch eine Plausibilitätsprüfung in einem angemessenen Rahmen eliminiert und eine Einbeziehung von Anwendern erst ab Aussagen einer bestimmten Qualität hergestellt. Die Anfertigung von bewertenden Aussagen für Warn- („Bewegung an Punkt XY“) und Alarmmeldungen („Hangbewegung wahrscheinlich“) unterliegt den spezialisierten Analyseanwendungen, die modular über die Dienste der Geodateninfrastruktur eingebettet sind. Nach der notwendigen Konfiguration dieser Anwendungen durch die Fachanwender ermöglicht diese Einbettung den größtenteils automatisierten Zugriff auf alle zur Verfügung stehenden Messdaten, sowie die ereignisbasierte Anstoßung von Funktionsprozessen und Benachrichtigung von Nutzern. Durch die ebenfalls automatisiert adjustierbaren Filterbedingungen der Benachrichtigungsmechanismen ist zudem eine Selbstkonfiguration der Analyseanwendungen möglich, die eine dynamische Anpassung auf äußere Einflüsse ermöglicht. Hierbei kann beispielsweise festgelegt werden, wie die Toleranzschwelle gegenüber Ganglinien oder Ausreißermessungen zu setzen ist oder wie stark Messwerte des Phänomens „Bewegung“ sein müssen, um die Analyseanwendung „Hangbewegung“ anzustoßen und entsprechende Fachanwender zu beachrichtigen. Durch die Einführung der synthetischen Phänomene „Bewegung“ und „Hangbewegung“ entlang der angedachten Analyseebenen findet zwar entgegen der Anforderungen der Anwenderbefragung eine Aggregation der Ursprungsdaten statt, diese ist jedoch nur als Ergänzung zu betrachten, die einen optimierten Austausch von Informationen und ereignisbasierten

Benachrichtigungen ermöglicht. Durch die entlang der Frühwarnkette einheitlich beibehaltenen Referenzen von Beobachtungsposition und -bezeichnung ist der Zugriff auf die jeweiligen Ursprungsdaten über SOS-Instanzen jederzeit möglich.

Der modulare Aufbau der präsentierten Frühwarnkette erlaubt die Modifizierung und Weiterentwicklung aller Teilkomponenten, ohne dass das Gesamtsystem beeinflusst wird. Unter Beibehaltung der jeweiligen Schnittstellen können Anwendungsanalysen im Ganzen ausgetauscht oder durch weitere Prozessierungsebenen ergänzt werden, ohne dass Auswirkungen auf die umgebende Diensteebene berücksichtigt werden müssen. Ebenso können Änderungen auf Hardwareebene im Aufbau des Sensor-netzes durchgeführt werden, ohne dass die Analyseanwendungen beeinflusst werden. Wie bereits am Ende von Kapitel 5.4.3 diskutiert ist dabei denkbar, dass die Analyseanwendungen z.B. neue Sensorknoten, bei entsprechender Einpflegung in die Datenhaltung der SOS-Instanzen durch den Betreiber, automatisiert über den Abruf von *GetCapabilities*-Dokumenten erkennen und durch eine ad hoc-Vermittlung als neue Datenquellen einbeziehen können. Für zukünftige Ausbaustufen ist darüber hinaus die Ausstattung der Analyseanwendungen mit (standardisierten) Webschnittstellen denkbar, um ihre Steuerbarkeit von außen und den Erhalt von Ergebnisprodukten zu verbessern. Im Rahmen der Behandlung der Anwendungen als virtuelle Sensoren ist z.B. die Anknüpfung an einen Sensor Planning Service (SPS) naheliegend, um Parameter der Analyseprozesse konfigurieren und die Qualität von Ergebnissen verbessern zu können. Weiterhin könnten die Analyseanwendungen über die standardisierten Schnittstellen eines Web Processing Service (WPS) als Prozessierungsressource für externe Nutzer und Informationssysteme bereitgestellt werden. Darüber hinaus könnten Rasterdaten der Analyseergebnisse z.B. in Form von sog. Heatmaps (siehe Abbildung 33 in Kapitel 6.3) als Kartengrundlage über das Antwortformat eines WPS oder über Web Map Service (WMS) zu Verfügung gestellt werden.

6.3. Informations- und Visualisierungsprodukte

Im Folgenden sollen die Möglichkeiten zur Anfertigung von Informations- und Visualisierungsprodukten für Messdaten diskutiert werden, die über die Diensteebene der Geodateninfrastruktur zur Verfügung gestellt werden. Zusätzlich soll dabei die Anbindbarkeit von Informationen der Analyseanwendungen bedacht werden, die im Rahmen des Systemkonzepts der Frühwarnkette in Kapitel 6.2 beschrieben wurden. Den Anforderungen der Anwenderbefragung folgend sollen die über den SOS angebotenen Daten statistisch aufbereitet und direkt lesbar sein, um dem Anwender entsprechende Informationen zu Bewegungsereignissen zeitnah anbieten zu können. Als Wunschform wurde hierbei die Darstellung eines zeitlichen Messverlaufs in Form eines X-Y-Diagramms genannt. Weiterhin ergibt sich für das SLEWS-Projekt die Notwendigkeit, den Ursprung der Messdaten in Form der Position der Sensorknoten als Punktoobjekte räumlich darzustellen. In Kombination mit der Forderung nach niedrigen technischen Einstiegshürden beim Zugriff und einfacher Handhabung im Umgang resultiert somit eine kartenbasierte Visualisierung der Daten, die sich entweder

in bestehende räumliche Arbeitsanwendungen der wissenschaftlichen Fachstelle (z.B. ESRI ArcGIS) einbinden lässt oder als komplett webbasierte Anwendung vorliegt.

Im Rahmen verschiedener SWE-basierter Forschungsprojekte wurden unterschiedliche Client-Anwendungen entwickelt (OGC, 2011c). Diese entstanden in der Form von Plugins für bestehende Desktop-GIS (QuantumGIS, ArcGIS, uDig) und Analyse-fachanwendungen (Matlab, R, Space Time Toolkit), Stand-Alone-Clients (auf 52° North SWE Client Framework aufsetzend) oder webbasierten Anwendungen (OOS-Tethys OpenIOOS, 52° North Thin SWE Client). Auch für den Einsatz auf mobilen Endgeräten (Smartphones mit Betriebssystem Android) wurden Client-Anwendungen entwickelt. Erfahrungen im Laufe des Projekts SLEWS haben jedoch gezeigt, dass der Großteil der entwickelten Client-Anwendungen einen noch sehr experimentellen Charakter aufweist und sich nicht ohne weiteres in andere Funktionskontexte übertragen lässt (z.B. durch Anknüpfung an einen fremden SOS). Ein Hauptgrund hierfür ist vor allem in der noch bestehenden Uneinheitlichkeit von SOS-Implementationen verschiedener Hersteller zu sehen. Eine Verbesserung dieses Umstands soll mit dem Versionsübergang von Spezifikationsnummer 1.0 auf 2.0 erfolgen.

Für die Visualisierung von über den SOS des SLEWS-Projekts bereitgestellten Messdaten wurden zwei prototypische Anwendungen umgesetzt. Für die Umsetzung des zuvor genannten Anforderungsprofils wurde eine webbasierte Client-Anwendung auf Basis des FOSS Framework OpenLayers umgesetzt. OpenLayers ist eine Funktionssammlung in Form einer JavaScript-Bibliothek, die zur Darstellung von räumlichen Daten im Webbrowser entwickelt wird. Neben umfangreichen Möglichkeiten zur Einbindung von Raster- und Vektordaten aus diversen (dienstebasierten) Ressourcen stehen seit ca. Versionsnummer 2.7 grundlegende Funktionen zur Verbindung mit einem SOS bereit. Nach einer entsprechenden spezifischen Anpassung mit dem SOS des Projekts konnten die Positionen der Sensorknoten (*feature of interest*) auf beliebigen Kartengrundlagen (wie z.B. hier gezeigt Geobasisdaten des Landesamts für innere Verwaltung Mecklenburg-Vorpommern) dargestellt und wichtige Kenndaten sowie aktuelle Messdaten der einzelnen Beobachtungsphänomene auf Anwenderwunsch angezeigt werden (siehe Abbildung 32). Für das Hinzufügen der Möglichkeit einer diagrammbasierten Visualisierung der abgefragten O&M-formatierten Daten wurde die auf der JavaScript-Funktionssammlung jQuery basierte Bibliothek flot verwendet.

SLEWS SOS Client

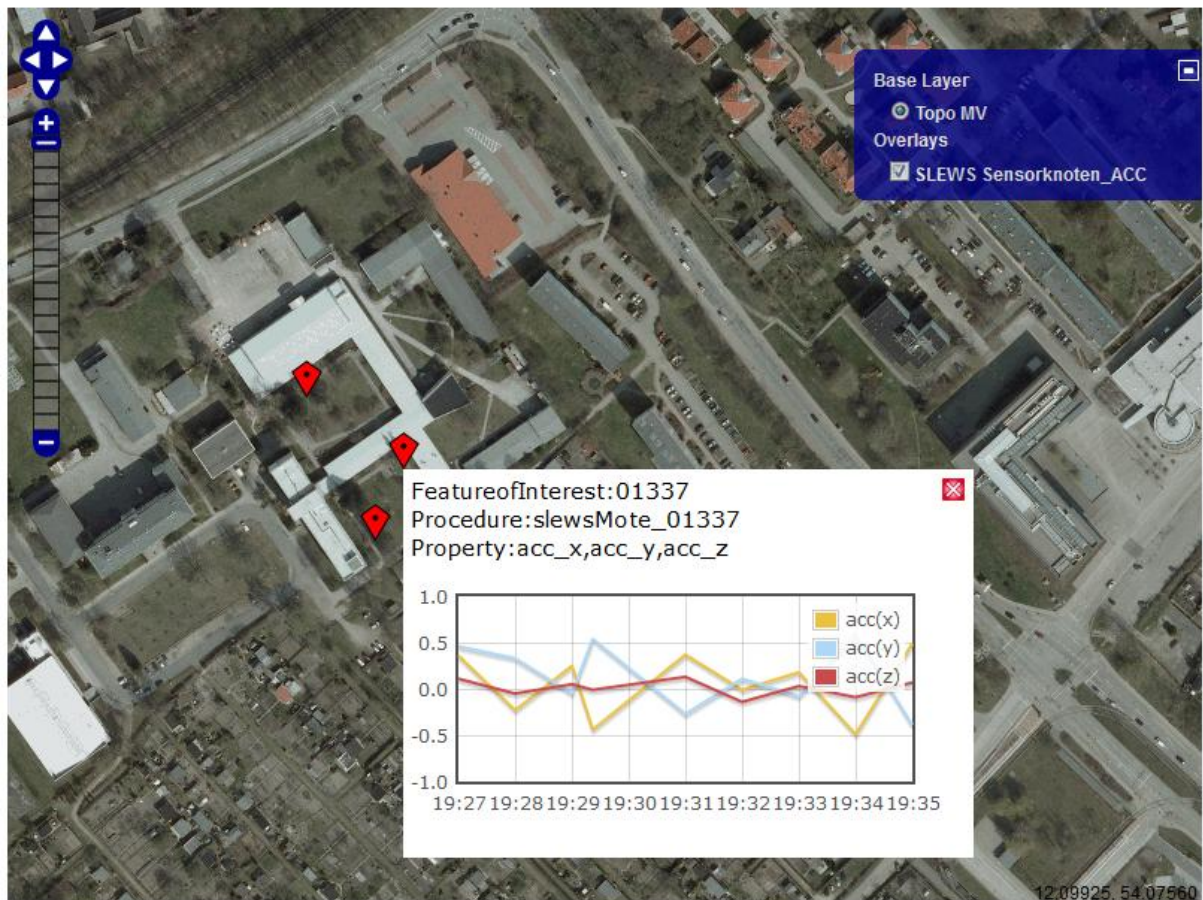


Abbildung 32: Browser-basierter SLEWS SOS-Client unter Verwendung des OpenLayers-Framework

Durch den beschriebenen Funktionsumfang des Clients werden alle zuvor geforderten Eigenschaften der Präsentation und Visualisierung von Informationen grundsätzlich abgedeckt. Jede der in Kapitel 6.2 beschriebenen SOS-Instanzen der Frühwarnkette könnte ohne weitere Modifikationen in den Client integriert werden. Die Zugänglichkeit ist durch die Ausführung im Webbrowser sehr einfach gehalten und der Umgang mit dem Kartenprodukt intuitiv. Fallspezifische Erweiterungen wie z.B. die Anpassbarkeit der Zeitachse zur Vergrößerung/Verkleinerung der betrachteten Messwertmenge oder die automatische Bildung von Mittelwerten (z.B. stündlich/täglich) sind einfach zu integrieren. Für einen Produktiveinsatz im jetzigen Entwicklungszustand muss bedacht werden, dass Anbindungen weiterer externer SOS als Datenquellen zwar möglich sind, aber entsprechend fallspezifisch implementiert werden müssen. Zukünftige, auf SOS Version 2.0 aufbauende, Entwicklungsversionen sollten diesem Umstand entgegenwirken können.

Weitere Informationsressourcen in Form von Raster- oder Vektordaten sind über standardisierte Schnittstellen von externen Web Feature Services (WFS) und Web Map Services (WMS) problemlos einzubinden. Hierzu können z.B. interpolierte Ergebnisse von in Kapitel 6.2 angedachten Analyseanwendungen (siehe Abbildung

33), Luftbilder, topographische wie auch spezielle Boden- und Wetterkarten gehören. Unter der Annahme, dass verschiedene Anwender entlang einer Frühwarnkette unterschiedliche Informationsprodukte benötigen (z.B. Zeitreihen für die Fachnutzer und Karten für die Einsatzkräfte), können verschieden angepasste Varianten der Client-Anwendung zum Einsatz kommen, auf welche die unterschiedlichen Nutzergruppen nach ihrer entsprechenden Position in der Handlungskette zurückgreifen können.

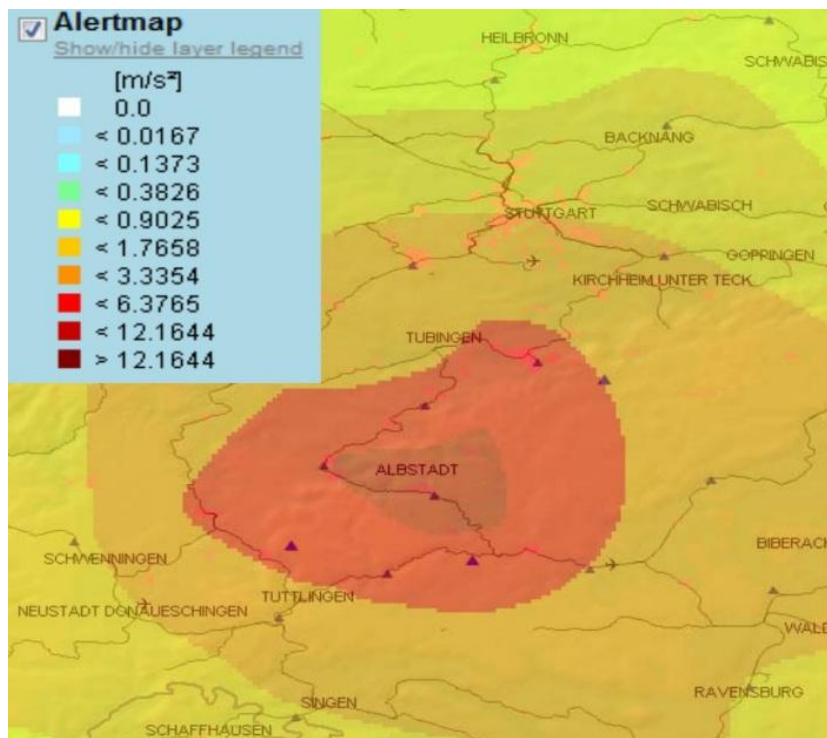


Abbildung 33: Interpolierte Heatmap bzw. Shakemap von Messungen zur Bodenbeschleunigung unter Einbeziehung des SLEWS-SOS (Quelle: EWS Transport, 2009)

Unter Vorarbeiten des Parallelprojekts EWS Transport im ‚Geotechnologien‘- Rahmenprogramm wurde zudem die Einbindung des SOS in die kommerzielle Modellierungs- und Analysesoftware Matlab durchgeführt (Abbildung 34). Ziel der experimentellen Umsetzung war es, die grundsätzliche Machbarkeit einer Anknüpfung der Sensordaten an eine Analyseanwendung zur Erstellung von komplexeren Zeitreihen- und Trendanalysen zu demonstrieren (SLEWS, 2011). Kartenbasierte Darstellungen kamen dabei nicht zum Einsatz.

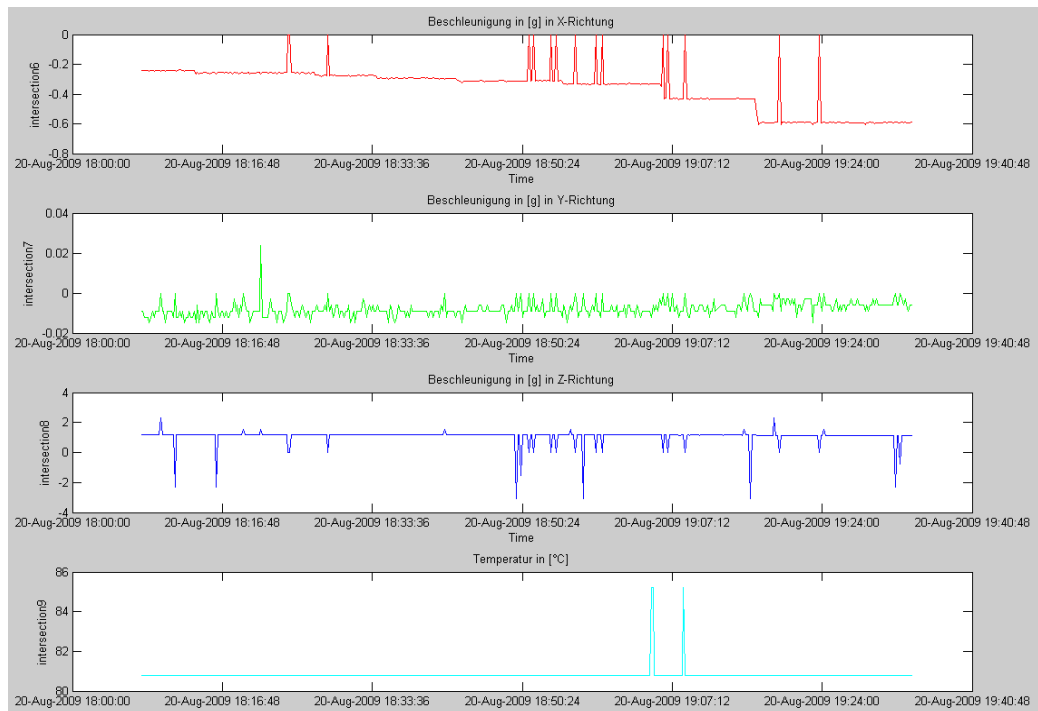


Abbildung 34: SOS-Client zur Zeitreihenanalyse von Messdaten auf Basis von Matlab

Das Einsatzfeld aller bisher genannten Dienste- und Formatstandards ist vor allem in der Anfertigung räumlicher Informationsprodukte in zweidimensionaler Kartenform zu sehen. Dreidimensionale Visualisierungskonzepte sollen im Rahmen dieser Arbeit zwar nicht entwickelt aber grundsätzlich berücksichtigt werden, was vor allem durch den Feldeinsatz des Projekts SLEWS an der Felsenbühne Rathen bei Dresden unterstrichen wird. Eine gleichmäßige über eine Ebene verteilte Ausbringung von Sensorknoten im Beobachtungsgebiet ist je nach Anwendungsfall nicht zwangsläufig gegeben und kann die Übersichtlichkeit einer Darstellung in zweidimensionaler Form an ihre Grenzen führen. Besonders ist dies z.B. bei der Instrumentierung von Objekten wie Felstürmen zu erkennen, bei der die Installationspositionen der Sensorknoten einer vertikalen Achse folgen. Trotz einer entsprechenden Erfassung der unterschiedlichen Höhenlagen der Sensorknoten wäre ein solcher Aufbau über herkömmliche kartenbasierte Methoden nicht überlagerungsfrei abbildbar.

Eine naheliegende Lösung besteht in der dreidimensionalen Darstellung der Sensorknoten im Raum. Umsetzungen existieren für diesen Einsatzzweck bisher jedoch entweder nur in Form von Stand-Alone-Lösungen oder sind, besonders im Web-Bereich, aufgrund von fehlenden Standards nur durch spezifische Zusatzanwendungen umzusetzen. Auch im Bereich der räumlichen Datenverarbeitung (OGC, 2010g, OSM-3D, 2012) wird an Konzepten und Standards zur Bereitstellung und Übertragung von 3D-Daten gearbeitet, doch auch in diesem Rahmen umgesetzte Anwendungen basieren nach wie vor auf der Installation spezieller Software auf Client-Seite (Applets, Browser Plug-ins). Eine Integrierung in die vorgestellten Informationsprodukte wäre zwar denkbar, aber aufgrund der Erhöhung der technischen Einstiegshürden nicht erstrebenswert. Jüngste Entwicklungen im Bereich der Webstandards könnten diesen Umstand allerdings maßgeblich verbessern. Aktuelle Techno-

logiestandards und Formate wie Web Graphics Library (WebGL) und Extensible 3D (X3D) ermöglichen die native Darstellung von 3D-Inhalten durch Standardfunktionen aktueller Webbrowser. Die Erweiterung von Informationsprodukten um dreidimensionale Visualisierungshilfen wird aufgrund der so gebotenen erleichterten Zugänglichkeit und Interoperabilität wesentlich greifbarer. Für den Einsatz mit der Geodateninfrastruktur des Projekts SLEWS wäre, wie auch von den Autoren der Web 3D Service-Spezifikation (W3DS, OGC, 2010g) angedacht, eine Kopplung des 3D-Dienstes an einen SOS als Datengrundlage denkbar. Positionen der Sensorknoten (*procedure* bzw. *feature of interest*) müssen dafür in dreidimensionaler Notation vorliegen und vom SOS (z.B. durch die Operationen *GetCapabilities* und *DescribeSensor*) abgerufen werden. Nach einer entsprechenden Umwandlung durch den W3DS können die Daten direkt über den Webbrowser visualisiert werden. Eine Verknüpfung mit den beschriebenen Informationsprodukten wäre somit einfach zu integrieren. Die räumliche Übersichtlichkeit würde sich zugunsten der Anwender verbessern und den Informationswert der Anwendung im Rahmen von Spezialfällen deutlich erweitern.

6.4. Informations- und Diensteorchestrierung des Informationssystems

Alle bisher in dieser Arbeit präsentierten Umsetzungen und Konzepte zur Erfassung, Verarbeitung, Analyse und Präsentation von Sensordaten ermöglichen den Aufbau eines frühwarnbasierten Informationssystems zur echtzeitnahen Überwachung von Hangrutschungsereignissen mithilfe einer standardisierten und dienstebasierten Geodateninfrastruktur. Das resultierende System erlaubt dabei sowohl die flexible Gestaltung der eigenen spezifischen Anwendungen und Prozesse, sowie auch die Einbeziehung fremder Prozessierungs- und Datenressourcen. Verschiedene Ebenen zur Analyse und Entscheidungsfindung können, mit entsprechenden Schnittstellen ausgestattet, als Glieder einer Frühwarn- und Handlungskette in beliebiger Länge aneinandergereiht werden und ermöglichen den Austausch von Informationen beginnend von Sensormessungen bis hin z.B. zu in situ-Befunden von ausgerückten Einsatzkräften (Ground Truth) in der gefährdeten Zone über eine zentrale Informationsinfrastruktur.

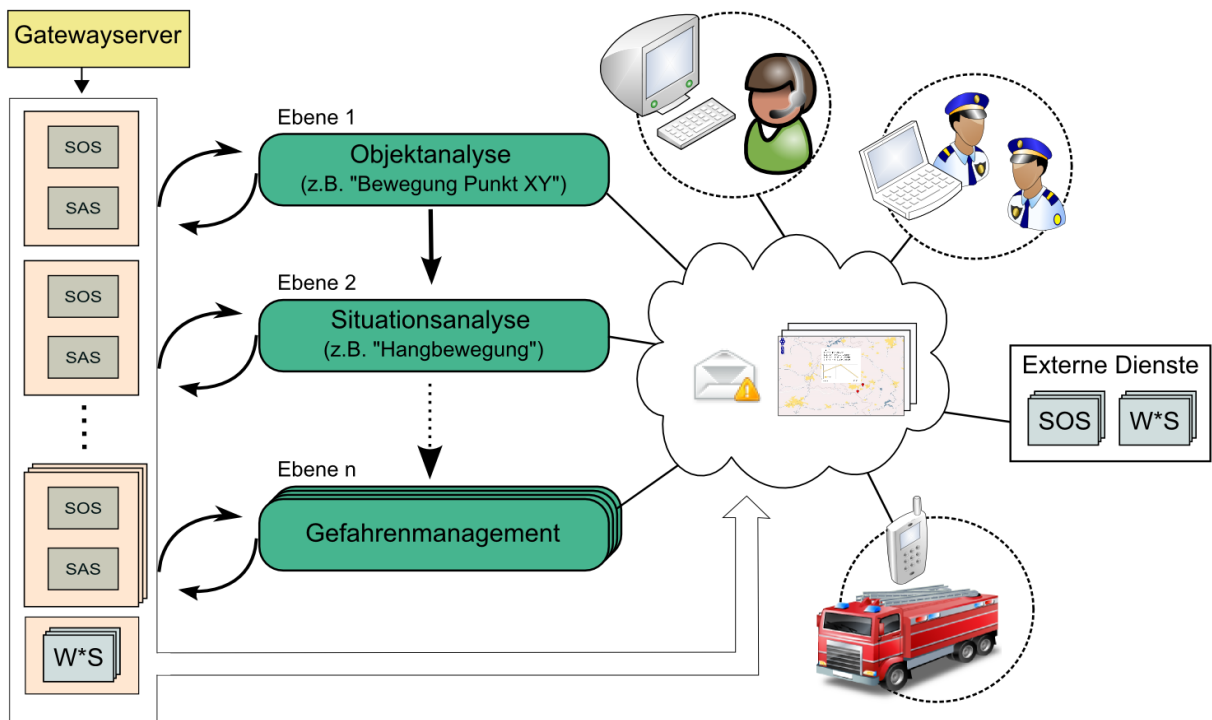


Abbildung 35: Flexible Informationsorchestrierung in einem Frühwarnszenario unter Verwendung des SLEWS-Informationssystems (W*S = Web Map/Feature/Coverage Service)

Abbildung 35 demonstriert das Informationssystem mit einer unbestimmten Anzahl von Ebenen. Die spezifischen Messdaten des SLEWS-Sensornetzes vom Gatewayserver werden nach ihrer Vorprozessierung, Formalisierung und Modellierung in die SWE-basierte Datenhaltung der Geodateninfrastruktur eingebracht und stehen ab diesem Zeitpunkt zum Abruf über SOS und für die Filterung und Vermittlung der ereignisbasierten Benachrichtigung über SAS bereit. Die zuvor beschriebenen Analyseanwendungen zur Identifizierung von Bewegungs- und Hangrutschungsereignissen (Ebene 1+2) bauen auf diesen Daten auf und nutzen sie z.T. zur Anstoßung und Steuerung von internen Funktionsabläufen (vgl. Kapitel 6.2). Ergebnisse dieser Prozesse stellen wiederum die Grundlage für darauf aufbauende Anwendungsebenen für z.B. verschiedenste Aspekte des Gefahrenmanagements dar (Ebene n). Anhand des präsentierten Konzepts werden aus den eingehenden und prozessierten Sensordaten wiederum Sensordaten, die in aggregierter und synthetischer Form eine höhere Informationsdichte für die folgenden Prozesse bieten. Analog zum zurückliegenden Ablauf können auch diese synthetischen Sensordaten entsprechend gefiltert und zur ereignisbasierten Benachrichtigung (Warnung bzw. Alarm) von Anwendern und anschließenden Ebenen verwendet werden. Weitere entstehende Informationsprodukte (z.B. Gefahrenkarten oder Bewegungsvektoren) können zentral (z.B. über WMS, WFS, WCS) abgelegt werden um für weitere Ebenen zur Verfügung stehen zu können (W*S in Abbildung 35).

Unterschiedlich ausgelegte Anzeige- und Visualisierungs-Clients (vgl. Kapitel 6.3) können an jeweils einer, an verschiedenen oder auch allen Ebenen angelagert sein und Anwender entweder auf eigene Anfrage oder aufgrund von zuvor erhaltenen Benachrichtigungen mit Informations- /Visualisierungsprodukten versorgen. Besonders

hervorzuheben ist die Möglichkeit der flexiblen Einbeziehung externer Ressourcen. Sowohl Analyseanwendungen wie auch Anzeige- und Visualisierungs-Clients können Daten (z.B. über SOS, WFS) und weitere Informationsprodukte (z.B. über WMS) externer Anbieter einbinden. Entsprechende Vorgänge sind dabei sowohl auf Abruf wie auch automatisiert denkbar. So wie bereits zuvor angedacht, interne Analyseprozesse über WPS-Schnittstellen für einen externen Gebrauch zur Verfügung stehen lassen zu können, ist im Gegenzug auch die Einbindung externer Anwendungen denkbar, um z.B. Analyseergebnisse alternativer Systeme einzubeziehen und die eigenen Ergebnisse überprüfen oder erweitern zu können. Während die Einbeziehung von inzwischen sehr ausgereiften und etablierten Standards wie WMS/WFS/WCS als problemlos und weitgehend interoperabel zu betrachten ist, sind bei der Einbeziehung von SOS die zuvor beschriebene Uneinheitlichkeit von Implementationen der Versionsnummer 1.0, sowie die fehlende Standardisierung der SAS-Spezifikation zu beachten. Entsprechende Modifikationen an den genannten Komponenten können aus Sicht des Autors jedoch unter absehbarem Aufwand berücksichtigt werden. Weiterhin setzt das Konzept die Nutzung entsprechender WPS-Profile für das O&M-Format voraus, die sich zurzeit noch in der aktiven Entwicklung befinden (OGC, 2010h).

Das aufgebaute Informationssystem ist in der Lage, alle Prozesse der Frühwarnkette zu unterstützen und z.B. bis hin zur Koordinierung von Aktionen der Einsatzkräfte im Feld zu begleiten. Hier ist z.B. die Nutzung der Infrastruktur auch im Einsatzszenario denkbar, um in situ-Beobachtungen (z.B. Geländesichtungen, Ground Truth, Evakuierungsfortschritte) zu sammeln und der Einsatzleitung bzw. wissenschaftlichen Fachstelle zeitnah und effizient mitteilen zu können. Zur Erhebung der Daten könnten Einsatzkräfte mit mobilen Endgeräten ausgestattet sein (angelehnt an Smartphones, Tablets) oder z.B. unbemannte Luftfahrzeuge (UAV bzw. Drohnen, siehe Grenzdörfer & Bill, 2010) zum Einsatz kommen. Die Abhängigkeit von einer Netzwerkinfrastruktur im Feld ist dabei zwar zu beachten, kann jedoch durch die Bildung von z.B. ad hoc-WLAN-Netzen (z.B. durch mobile Hotspots an Bord von Einsatzfahrzeugen oder UAVs in der Luft über dem Einsatzgebiet) kompensiert werden.

Alle Details, wie die zugrunde liegenden Sensordaten und Analyseprodukte, stehen u.a. über Persistenz des Raumbezugs vertikal durch alle Ebenen hindurch immer auffindbar zur Verfügung (vgl. Abbildung 35). Ausfälle einer Ebene bzw. eines Kettenglieds führen somit, anders als bei sequentiellen Abläufen monolithischer Architekturen, nicht zwangsläufig zum Versagen der Gesamtkette. Trotz einer angedachten horizontal-hierarchischen Gruppierung von Nutzern, Analyseprozessen und Informationsanwendungen (vgl. Abbildung 30) können Querverbindungen jederzeit hergestellt und auf Daten und Informationen anderer Ebenen zugegriffen werden. Trotz der beschriebenen Aggregation in Form von synthetischen Sensordaten zur Anreicherung der Aussagequalität, können die zugrunde liegenden Ressourcen jederzeit hinzugezogen und rekombiniert werden. Der Grad an zur Verfügung stehenden Details wird in einem SWE-basierten, im Gegensatz zu einem klassischen Frühwarnsystem, somit zu keinem Schritt kleiner und kann durch eine Anreicherung der

Qualität der zu bildenden Aussagen sogar ständig erweitert werden (siehe Abbildung 36).

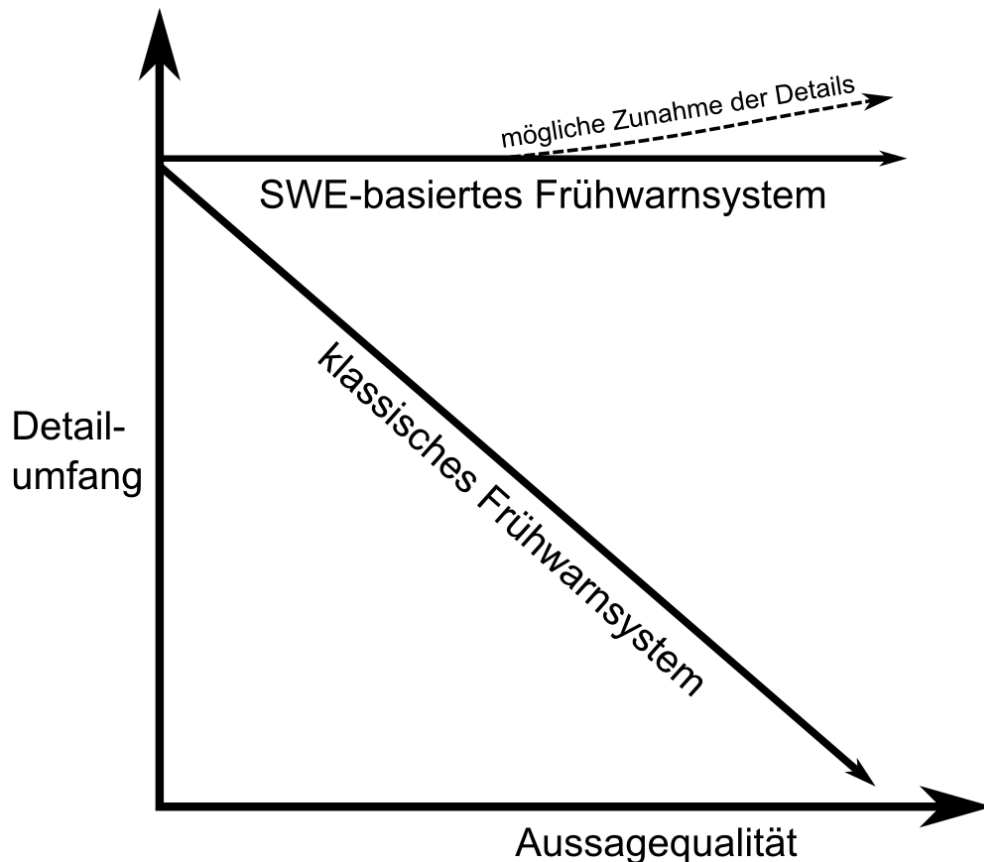


Abbildung 36: Vergleich des Verhältnisses Detailumfang ↔ Aussagequalität entlang einer Frühwarnkette in klassischen und SWE-basierten Frühwarnsystemen

Weiterhin kann das Informationssystem bzw. das zugrunde liegende Sensorsystem über seinen spezifischen Anwendungsbereich hinweg in anderen Anwendungskontexten verwendet werden und kann auch entsprechend selbst externe Systeme einbeziehen (siehe Kapitel 6.5). Mehrwerte dieses Systemkonzepts offenbaren sich besonders bei einem direkten Vergleich mit monolithisch konzipierten Anwendungen und Systemen mit integrativen Blackbox-artigen Verarbeitungsvorgängen. Im Gegensatz zum hier präsentierten Ansatz sind Auswertungen dieser Systeme nur spezialisiert auf die vorliegende Sensortechnik angepasst und fest mit anschließenden Analysevorgängen gekoppelt. Resultierende Informationsprodukte und Aussagen sind für einen spezifischen Verwendungszweck ausgelegt und nur schwer in einen anderen Kontext zu versetzen.

6.5. Interoperabilitätsnachweis

Die bisher beschriebene anwendungs- und systemübergreifende Nutzung von SWE-basierten Datenhaltungen konnte mehrfach anhand von Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit festgestellt werden. Anhand von zwei Anwendungsbeispielen soll diese Interoperabilität zusammenfassend demonstriert werden.

Die Verbindung von hangrutschungsspezifischen Prozessen mit meteorologischen Beobachtungen wie z.B. Niederschlagsmessungen wurde in den vergangenen Kapiteln mehrfach als naheliegend herausgestellt. Während zwar von offiziell amtlichen Stellen nach Wissensstand des Autors keine Wetterinformationen über SWE-basierte Schnittstellen bereitgestellt werden, existieren Bestrebungen verschiedenster (Forschungs-)Projekte, entsprechende Daten über SOS anbieten. Als Beispiel ist ein Dienst der Firma Terrestris GmbH zu nennen, über den Daten von Wetterstationen aus verschiedenen deutschen Städten angeboten werden (vgl. <http://ows.terrestris.de/dienste.html#sos>). Aufgrund der Nutzung einer SOS-Implementation des gleichen Herstellers (52° North) wie im Projekt SLEWS, konnten alle zur Verfügung stehenden Wetterstationen problemlos in die in Kapitel 6.3 beschriebene Visualisierungsanwendung eingebunden werden (siehe Abbildung 37).

SLEWS SOS Client



Abbildung 37: Einbindung von Wetterstationen über einen externen SOS der Firma Terrestris GmbH in eine SLEWS-Visualisierungsanwendung

Als weiteres Beispiel ist die Nutzung von Daten des Projekts SLEWS in einer externen Anwendung zur Simulation von Erdbebenauswirkungen im Rahmen eines Interoperabilitätstests zu nennen. Als Ergebnis von sich wiederholenden Synergien- und Experten-Workshops des Geotechnologien-Rahmenprogramms entstand die Zusammenarbeit zwischen den Projekten ILEWS, EWS Transport und alpEWAS.

Diese Arbeit gipfelte in einem Pilotversuch zur zentralen Integration der verschiedenen Projektdatenbestände in eine zentrale Anwendung (EWS Transport, 2009). Als Ergebnis präsentierte EWS Transport auf einem Statusseminar 2009 in München ein kartenbasiertes Informationssystem für Erdbebensimulationen. Messdaten der Projekte SLEWS und ILEWS konnten dabei zusammen mit internen Daten über SOS-Schnittstellen zu einer Shakemap aggregiert werden (Abbildung 38). Experimentell wurde dazu SLEWS-Sensorik virtuell räumlich in das betroffene Beobachtungsgebiet versetzt und diente dort als zusätzliche Messdatenstation für die Erfassung von Bodenbeschleunigungswerten.

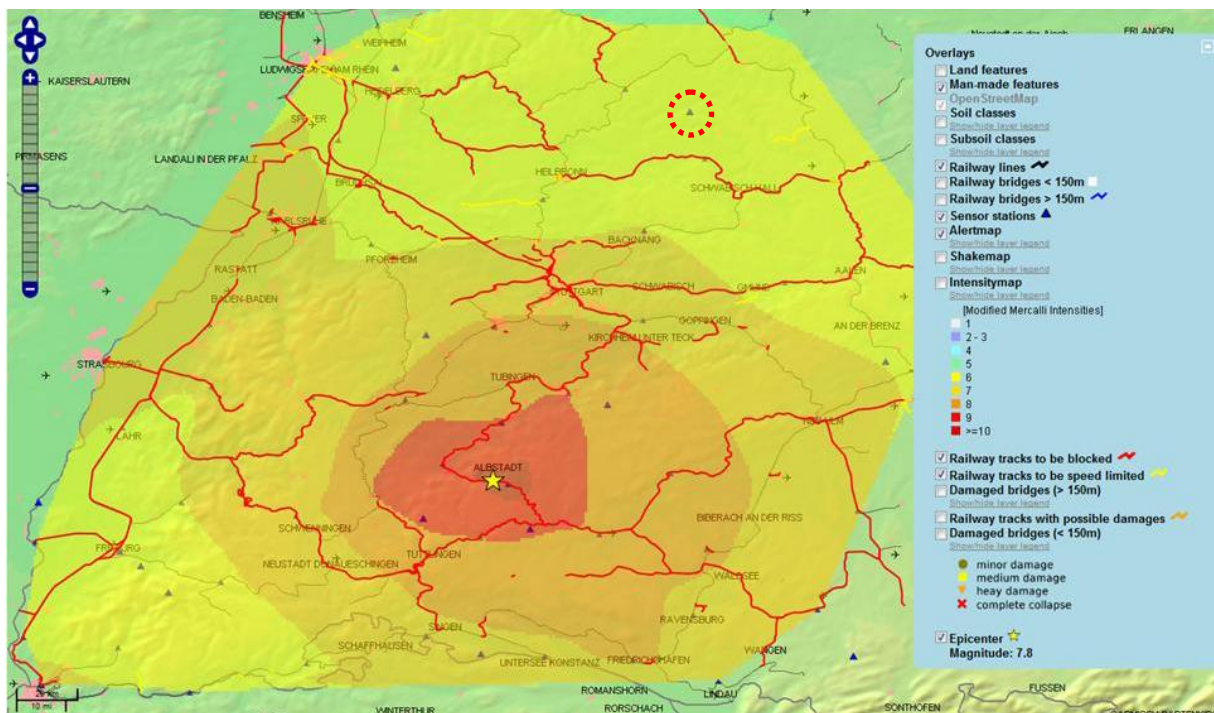


Abbildung 38: Earthquake Early Warning Simulator unter Einbeziehung des SLEWS-SOS (rote Markierung, Quelle: EWS Transport, 2009)

6.6. Möglichkeiten zur ad hoc-Informationssorchestrierung

Die im Rahmen von Kapitel 1.2 beschriebenen Zielsetzungen der Herausstellung des Potentials von räumlicher Dienstetechnologie am konkreten Beispiel von Hangrutschungen wurden bisher im Rahmen dieser Arbeit eingehend behandelt. Bezug nehmend auf offene Forschungsfragen konnte dabei jedoch der Bereich der Automatisierung der Recherche und Vermittlung von Diensteressourcen (Punkt 2) aufgrund von noch akuten Problemen bei der technischen Realisierung bisher noch nicht ausreichend geklärt werden. Das demonstrierte Konzept eines Informationssystems zeichnet sich zwar durch gute Flexibilität bei der Einbeziehung verschiedenster Daten- und Prozessierungsressourcen aus, ist jedoch in Hinsicht auf die Zielsetzung einer automatisierten ad hoc-Orchestrierung beliebiger Quellen als „fest verdrahtet“ zu bezeichnen. Da es sich jedoch generell um eine Anwendung im Frühwarnbereich handelt, wobei eine a priori-Orchestrierung sogar zwingend vorauszusetzen ist,

nehmen entsprechende ad hoc-Methoden zwar keinen hohen Stellenwert ein, wären jedoch zur Nutzung des vollen Potentials der Anwendung durch Einbezug aller aufzufindenden Informationsquellen durchaus erstrebenswert. Ziel ist es hierbei vor allem, Anwendungen und Anwendern Informationen „just in time“ zu vermitteln, ohne dass entsprechende Ressourcen vor Prozessbeginn bekannt sein müssen. Probleme diesbezüglich bestehen sowohl auf semantischer (siehe Kapitel 5.5) wie auch syntaktischer Ebene (siehe Kapitel 5.4.3) und werden in der SWE-Initiative wie auch im Rahmen aller Standardisierungsarbeiten des OGC aktiv untersucht. Verschiedene Ansätze bezüglich der Auffindbarkeit von Sensoren (Sensor Instance Registry, SIR), Beobachtungsphänomenen (Sensor Observable Registry, SOR) sowie der Einbeziehung von Sensordatenquellen in Kataloganwendungen existieren bzw. befinden sich in Entwicklung und sollen im Folgenden im Kontext einer frühwarnbezogenen Anwendbarkeit für eine ad hoc-Orchestrierung betrachtet werden. Hierbei steht nicht die initiale Verbindung von Anwendern und Anwendungen mit einem Sensorsystem zur Datengrundversorgung, sondern vor allem die zusätzliche Versorgung einer bestehenden Anwendung mit ergänzenden Informationen zu Unterstützungszwecken im Mittelpunkt.

Da es im akuten Bedarfsfall, besonders in einem zeitkritischen Kontext, nicht praktikabel ist, neue und ergänzende Informationsquellen manuell zu recherchieren und unter Umständen fehleranfällig zusammenzuführen, bedarf es automatisierten Mechanismen, die Anwender bestmöglich zu entlasten und über zusätzliche Informationsquellen in Kenntnis zu setzen, ohne von relevanten Prozessen abzulenken. Aus Sicht des Autors sollte dieser Vorgang entgegen herrschender Trends jedoch nach wie vor unter Einfluss eines entsprechend ausgebildeten Anwenders stattfinden und nur eine minimale automatisierte Voraggregation bei der Zusammentragung von Informationsressourcen zu einem Endprodukt umfassen, um so den Informationsgehalt aller beteiligten Quellen bestmöglich zu bewahren. Die durch die Verwendung von Dienstetechnologie gewonnene Flexibilität und die Verfügbarkeit verschiedenster Datenquellen kann so besser verwertet werden und hebt sich deutlich von Blackbox-artigen Funktionsweisen monolithischer Systeme ab. Jedoch sind bei einem angeordneten „just-in-time“-Erhalt von Informationen zur Verwendung im beschriebenen Informationssystem zwei unterschiedliche Anforderungsfälle zu unterscheiden. In einem ersten Schritt sollen Informationsquellen recherchiert und Möglichkeiten einer Nutzung und Zusammenstellung untersucht werden. In einem nächsten Schritt soll die Möglichkeit bestehen, resultierende Informationsprodukte werterhaltend entlang der Anwendungsebenen einer Frühwarnkette weiterzureichen, ohne entsprechende Schritte wiederholen zu müssen. Hierbei soll die Zusammenstellung eines Informationsprodukts aus verschiedenen Quellen und Datensätzen, wie z.B. von der wissenschaftlichen Fachstelle oder Einsatzleitung zum Beginn eines Einsatzszenarios initial vorgenommen, in Form einer gemeinsam für alle folgenden Nutzer gültigen „Sicht“ (auch *Common Operational Picture* genannt, vgl. Wikipedia, 2012) weitergegeben werden. Eine Aggregation je nach Informationsbedarf und Position in einer Handlungskette kann für nachfolgende Empfänger ab diesem Punkt erwünscht und sinnvoll sein (z.B. zusammengefasste Gefahrenkarten für Einsatzkräfte).

Das folgende Übersichtskonzept soll die Möglichkeiten einer flexiblen ad hoc-Orchestrierung von verschiedenen OGC (Sensor Web-)Dienstern zu Erstellung eines frühwarnbezogenen Informationsprodukts und die ansprechende Vermittlung diskutieren. Es basiert auf den bestehenden Konzepten des SIR/SOR und der Integration von SWE-basierten Metadaten in bestehende Kataloganwendungen. Angedacht ist dabei die Nutzung einer Recherche- und Orchestrierungsanwendung (kurz R&O-Anwendung), die zwischen Nutzer, Kataloganwendungen (CSW) sowie SIR/SOR vermittelt. Es werden die Annahmen getroffen, dass Metadaten von SOS-Instanzen ebenso wie die der bereits etablierten Dienste (W*S) anhand eines Netzes von Katalogdiensten (CSW) recherchiert und ausfindig gemacht werden können. Dienste, die auf den Konzepten SOR/SIR basieren, sollen sich darüber hinaus in praktischer Anwendung befinden, de facto- oder de jure-Standards bei der Arbeit im SWE-basierten Umfeld sein und die in Kapitel 5.5.1 erläuterten Erweiterungen zur semantischen Anbindung in Form von *community tags* umsetzen.

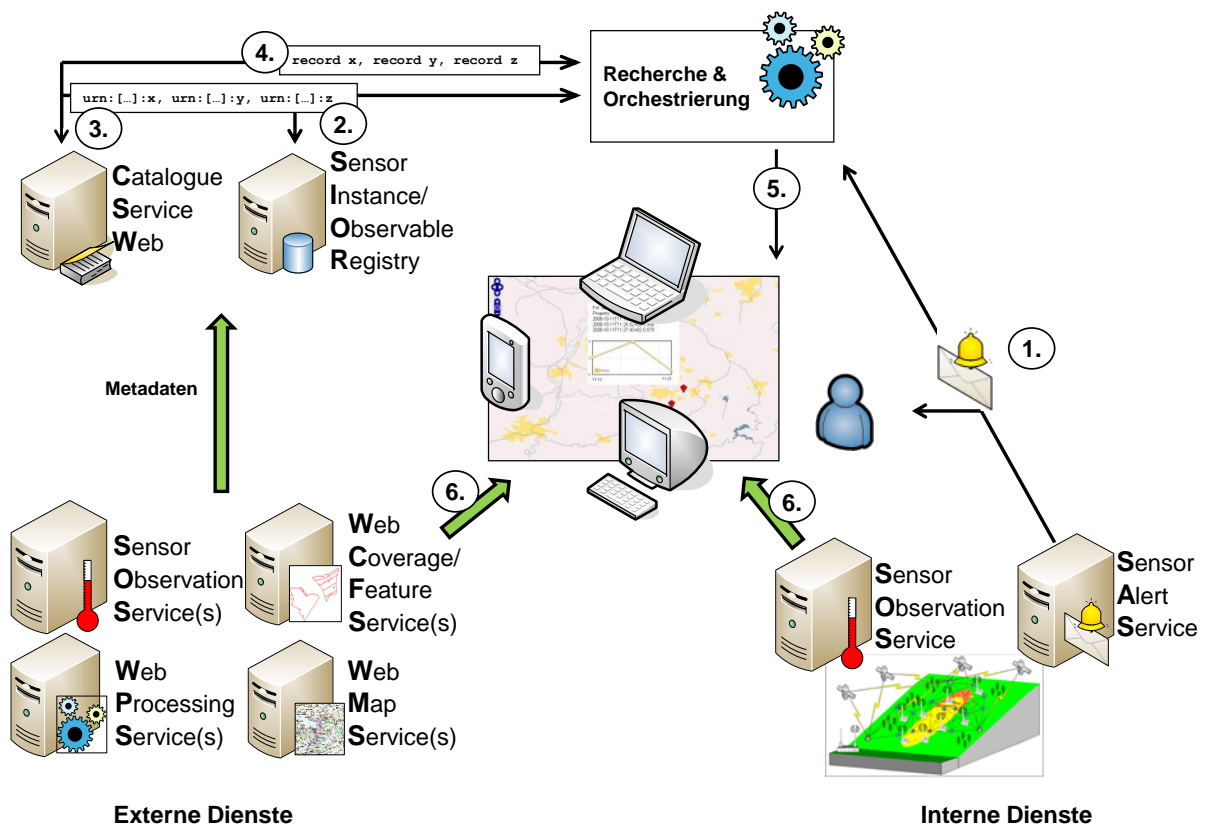


Abbildung 39: Konzept zur ad hoc-Informationsorchestrierung von Diensten im Frühwarnbereich

In dem angedachten Szenario (illustriert in Abbildung 39) ist der Anwender eines frühwarnbasierten Informationssystems mit entsprechenden Informationsprodukten an eine SWE-basierte Datenhaltung angeschlossen und ist für den Erhalt von ereignisbasierten Benachrichtigungen (über SAS/SES) registriert. Bei Eintritt eines Benachrichtigungsfalls (Punkt 1) wird eine entsprechende Benachrichtigung sowohl an den Anwender sowie an die R&O-Anwendung übermittelt (siehe hierzu auch

Kapitel 6.2). Mit den im Vorhinein über den SOS synchronisierten Angaben bzw. URIs zu Beobachtungsphänomenen, Sensorinstanzen und semantischen Konzepten der Anwendungsbeschreibung wendet sich die angestoßene R&O-Anwendung an das SOR/SIR (Punkt 2). Über die SIR/SOR-Diensteschnittstellen wird nun auf entsprechende Übereinstimmungen der Datensätze mit den übergebenen URIs recherchiert, um herauszufinden, mit welchen anderen Beobachtungsphänomenen, Sensoren und Anwendungskonzepten ein Zusammenhang bestehen könnte. Bei einem Fund besteht die Rückgabe in einer Liste mit URIs von Sensoren bzw. Beobachtungsphänomenen. Mit Parametern der in der ursprünglichen Benachrichtigung des SAS/SES enthaltenen Angaben zu Ort, Zeit und der Liste der möglichen relevanten URIs des SIR/SOR stellt die R&O-Anwendung automatisiert eine Anfrage an einen bzw. mehrere Katalogdienste (z.B. über die Operationen *DescribeRecords/GetRecords*, Punkt 3). Die Kataloganwendung kann aufgrund der ausreichend bekannten Parameter (Was? Wann? Wo?) Auskunft liefern, ob genannte URIs in der Metadatenammlung enthalten sind und ob mit dem Eintrag verbundene räumliche und zeitliche Parameter zu denen der Anfrage passen. Antworten der Kataloge (Punkt 4) werden von der R&O-Anwendung auf enthaltene Diensteadressen und Angaben zu Datensätzen und Themen überprüft und an den Anwender zurück übermittelt (Punkt 5).

Die entsprechenden Diensteressourcen stehen nun zur Begutachtung des Nutzers zur Verfügung und können je nach Bedarf zur Erstellung von Informationsprodukten herangezogen werden. Hierzu werden die in der Rückgabe der R&O-Anwendung referenzierten externen Dienste zusätzlich zu den bereits bekannten internen Diensten abgefragt (Punkt 6). Dieser Vorgang kann parallel zu den Kernprozessen des Informationssystems und der Frühwarnkette laufen. Durch den weitgehend automatisierten Prozessablauf der Recherche ist eine zeitnahe Abwicklungszeit gewährleistet, die für den Einsatz in einem Frühwarnkontext geeignet wäre. Der Nutzer kann im Idealfall auf eine wesentlich erhöhte Informationsvielfalt zurückgreifen ohne dabei mit dem Beschaffungsvorgang konfrontiert zu werden. Eine endgültige Evaluierung der Ressourcen liegt zwar weiterhin auf Seiten des Nutzers, kann jedoch entsprechend der Gestaltung und Abstimmung zwischen Client und R&O-Anwendung auf spezifische Bedürfnisse abgestimmt und optimiert werden.

Während die beschriebene Möglichkeit der ad hoc-Orchestrierung von Diensteressourcen im Handlungsbereich eines entsprechenden Fachnutzers naheliegend ist, muss die Übergabe resultierender ergänzender Zusatzinformationsprodukte entlang der Frühwarnkette stärker gekapselt sein, um z.B. Einsatzkräften im anlaufenden Einsatzfall zusätzliche Informationen in Form von Gefahrenkarten nachreichen zu können, die in der a priori-Orchestrierung des Informationsprodukts dieser Ebene ursprünglich nicht berücksichtigt waren. Für diesen Fall würde sich grundsätzlich die Übermittlung in Form eines Kontextformats eignen, durch das Informationsressourcen sowie die Vorschrift zu deren Visualisierung erfasst und interpretiert werden können. Ein solches Kontextdokument könnte kompakt und zeitnah an die Client-Anwendungen der Einsatzkräfte übermittelt werden und entsprechend wie vorgese-

hen visualisiert werden. Als entsprechendes Format ist die Nutzung des etablierten OGC-Standards Web Map Context (OGC, 2005b) naheliegend, der jedoch auf den Umgang mit dem WMS-Standard begrenzt ist. Eine Erweiterung dieses Standards in Form des Formats OWS Context (OGC, 2011d) befindet sich in der Bearbeitung und soll die Nutzung um die Dienste WFS und WCS erweitern. Im Rahmen einer Implementierung wäre somit die Nutzung des OWS Context-Formats vorzuziehen.

Im beschriebenen Übersichtskonzept ist die Nutzung der ad hoc-Orchestrierung von Diensteressourcen und der dadurch umgesetzte „just-in-time“-Austausch von Informationen grundsätzlich als erstrebenswerte Ergänzung im Rahmen einer Frühwarnkette zu betrachten. Entsprechende Umsetzungen müssten zum jetzigen Zeitpunkt mit Berücksichtigung der technischen Limitierungen ohne Nutzung von verabschiedeten Standards umgesetzt werden. Eine Verbesserung dieser Umstände ist jedoch absehbar. Die Etablierung des Konzepts *Common Operational Picture* im Bereich der dienstebasierten Informationssysteme und besonders im Frühwarnbereich unter Verwendung genannter Kontextformate ist darüber hinaus als lohnenswerte Ergänzung anzusehen. Die Adaption der Mechanismen muss jedoch eng mit den fallspezifischen Anforderungen des vorliegenden Informationssystems und insbesondere mit den Anforderungen der einzelnen Prozessebenen und ihrer jeweiligen Informationsprodukte geschehen.

7. Fazit

7.1. Bewertung der Zielstellungen

Im Rahmen dieser Arbeit wurde herausgestellt, wie Daten eines anwendungsspezifischen Sensorsystems zur Beobachtung von Hangrutschungsereignissen angepasst werden müssen, um echtzeitnah über standardisierte Diensttechnologien angeboten werden zu können. Durch die interoperable Einbindung über die Technologie moderner Geodateninfrastrukturen kann die Grundlage für ein räumliches frühwarnbezogenes Informationssystem zur Verfügung gestellt werden, in das, basierend auf dem durch die ausgewählten Beobachtungsphänomene entstandenen Informationsprofil, hangrutschungsbezogene Analyseprozesse flexibel eingebettet werden können. Ergebnisse dieser Prozesse fließen zurück in die Datenhaltung der Geodateninfrastruktur und können wiederum mithilfe von Funktionen der ereignisbasierten Benachrichtigung und weiterer Analyseebenen in ein abgestuftes Warn- und Alarmkonzept umgesetzt werden. Hervorzuhebende Systemeigenschaften wie Modularität, Flexibilität sowie interne und anwendungsübergreifende Interoperabilität stellen dabei die wesentlichen Fortschritte gegenüber fest verzahnten und Blackbox-artigen Systemen monolithischen Designs dar.

Die in den Zielsetzungen in Kapitel 1.2 benannten offenen Forschungsfragen konnten anhand gewonnener Rückschlüsse in unterschiedlichem Umfang erörtert werden.

Die in Punkt 1 angesprochene Integrierung und Verschneidung verschiedenster räumlicher Datenquellen konnte im Rahmen des standardisierten Umfelds der OGC (Sensor Web Enablement)-Technologien demonstriert werden. Daten eines Sensorsystems mit proprietären Formaten und Schnittstellen des Herstellers ScatterWeb konnten mit Daten anderer Quellen über bereits etablierte räumliche Schnittstellen zu Informationsprodukten verschnitten werden (siehe Kapitel 6.3). Als besonders relevant ist hierbei die Möglichkeit zu nennen, Daten von Sensorsystemen unterschiedlicher Verwendungszwecke in andere Anwendungskontexte übertragen zu können. Erfolgreiche Nachweise dieser Interoperabilität konnten in gemeinsamen Arbeiten mit Parallelprojekten des BMBF „Geotechnologien“-Rahmenprogramms erbracht werden. Messdaten des Projekts SLEWS wurden dabei über SOS-Schnittstellen mit Daten des Projekts EWS Transport zusammengeführt. Die Prozessierung des gemeinsamen Datenbestands resultierte in einem Informationsprodukt zur Simulation und Visualisierung von Erdbebenauswirkungen (siehe Kapitel 6.5).

Möglichkeiten der in Punkt 3 angesprochenen Kopplung mit Auswertungs- und Modellierungsprozessen konnten anhand von Beispielen und Konzepten erläutert werden. Neben der einfachen Anbindung von etablierten Analyse- und Simulationsfachwerkzeugen an SOS-Datenquellen (wie z.B. Matlab, siehe Kapitel 6.3) konnte die generische Einbettung von hangrutschungsspezifischen Analyseprozessen in eine Geodateninfrastruktur zur Umsetzung eines flexiblen Informationssystems demons-

triert werden. Neben der Unterstützung verschiedener Analyseebenen und Anreicherung der Qualität von Aussageresultaten, ermöglicht die Geodateninfrastruktur mithilfe ereignisbasierter Kommunikationsmechanismen die Teilautomatisierung dieser Prozessketten und die situationsspezifisch erforderliche Benachrichtigung des Anwenders. Weiterhin ist durch das Vorliegen einer entsprechend aufbereiteten SWE-basierten Datenhaltung die Einbeziehung von externen Prozessierungs- und Analyseanwendungen über standardisierte Schnittstellen (Web Processing Service mit O&M-Profil) möglich.

Die in Punkt 2 genannten Mechanismen zur automatisierten Auffindung und ad hoc-Orchestrierung von dienstebasierten Informationsressourcen durch die semantische Interpretation von Anfragen und dafür notwendige technische Voraussetzungen wurden an verschiedenen Stellen dieser Arbeit diskutiert. Hierbei konnten verschiedene offenstehende Defizite der aktuellen Technologie identifiziert werden. Konzepte aktueller Lösungsansätze wurden untersucht und Verbesserungspotential erörtert.

7.2. Abschließende Bewertung der OGC SWE-Technologie

Der grundsätzliche Nutzen der Anwendung und insbesondere die Verwertbarkeit von Konzepten und Standards der OGC SWE-Initiative muss unter verschiedenen Gesichtspunkten betrachtet werden. Die Grundbestrebungen der SWE-Technologien sind darum aufgebaut, bestehende Grenzen und Flaschenhälse des Austauschs von umweltbezogenen Daten und insbesondere Sensordaten zwischen unterschiedlichen und zuvor meist getrennten Anwendungsbereichen zu überbrücken. Sensoren und Sensordaten sollen interoperabel auffindbar und „Plug&Play“-artig zugreifbar gemacht werden. Der Ansatz, die Standardisierung weder zu nah an der Sensorebene noch an der Anwendungsebene umzusetzen, ist dabei sinnvoll gewählt, da aufgrund der sehr großen Breite verschiedener Sensorsysteme und Anwendungen die Substitution bestehender Formate und Schnittstellen nur wenig Erfolgsaussicht versprechen würde. Die Einführung einer entsprechenden Abstraktionsebene zwischen Sensor- und Anwendungsebene durch SWE-basierte Schnittstellen und Formate kapselt spezifische Eigenschaften, die einen Austausch erschweren könnten, und stellt so einen praktikablen Ansatz zur Herstellung einer umfassenden Interoperabilität her. Darüber hinaus lehnen sich SWE-Standards an bereits etablierte und verbreitete räumliche Dienste- und Formatstandards des OGC an, die sowohl auf wissenschaftlicher, wirtschaftlicher wie auch gesetzlicher Ebene Einfluss finden.

Neben den offensichtlichen konzeptionellen Vorteilen muss jedoch auch der Stand der aktuellen Umsetzbarkeit der genannten Zielsetzungen berücksichtigt werden. Die angestrebte „Plug&Play“-Fähigkeit ist aufgrund verschiedener Interoperabilitätslücken sowohl zwischen Sensor- und SWE-Ebene, wie auch zwischen SWE- und Anwendungsebene nicht umsetzbar. Hierzu zählen fehlende Mechanismen zur Anbindung von Sensorsystemen an die Diensteebene, zu starke Variationsmöglichkeiten bei der Modellierung und Codierung von Daten durch zu hohe Abstraktion, uneinheitliche Schnittstellenimplementationen und eine fehlende semantische

Harmonisierung. Trotz der angestrebten Vereinfachung erhöhen die genannten Umstände den Aufwand des Einsatzes der SWE-Technologie auf dem jetzigen Entwicklungsstand und steigern anfallende Implementationskosten beträchtlich. Um eine reibungslose Umsetzung zu gewährleisten, müssen spezifische Adapter auf Sensorseite programmiert, die Modellierung und Formalisierung der Rohdaten unter Voraussetzung des späteren Zugriffs und Wiederverwendbarkeit geplant und Anzeige- und Visualisierungsclients sowie Analyseanwendungen spezifisch auf die Variante des verwendeten SOS angepasst werden. Verbesserungen dieser Umstände sind mit dem Übergang der SWE-Standards von Versionsnummer 1.0 auf 2.0 geplant. Für die bisherig durchgeführten Umsetzungen von SWE-basierten Systemen der ersten Generation bedeutet dies allerdings, dass die Vorgaben entsprechend der Standards zwar umgesetzt wurden, eine reibungslose Interoperabilität zwischen verschiedenen Systemen jedoch nicht ohne weiteres gegeben ist.

Der entstehende Mehrwert der Nutzung von SWE muss deshalb von Anwendungsfall zu Anwendungsfall neu bewertet werden. Einfache Alternativen und de facto-Lösungen zum webbasierten Austausch von Sensordaten existieren. Anwendungen wie Pachube bieten einen integrierten Ansatz zur Einbringung und Visualisierung von Sensordaten, der dem SWE-basierten Ansatz in der gebotenen Einfachheit zurzeit noch überlegen ist. Analoge Versuche dieses Ansatzes existieren zwar auch in der SWE-Welt (GeoCENS, 2012), ihre entsprechende Praktikabilität muss sich aufgrund des nicht umgehbaren Overhead und der entsprechenden Einschränkungen des unflexiblen integrierten Abrufs der Daten jedoch herausstellen. Nutzeranalysen des Pachube-Portals zeigen, dass 95% aller Anwender ca. 5% des gebotenen Funktionsumfangs nutzen (Pachube, 2011). Der Bedarf an Einfachheit im Umgang mit Sensordaten ist klar zu erkennen und kann direkt auf den SWE-Einsatz übertragen werden (Vector 1 Magazine, 2011). Maßnahmen zur Vereinfachung, wie z.B. die Profilbildung von SensorML- und O&M-Dokumenten oder der Einsatz von SWE Connector-Anwendungen, ist notwendig, um die SWE-Nutzung in einem breiteren Anwenderkreis, sowohl bei Nutzern wie auch bei Anbietern von Sensordaten, voranzutreiben

Für das Projekt SLEWS stand bei der Nutzung der SWE-Standards vor allem die Erforschung der Möglichkeit des Einsatzes in einem frühwarnbezogenen Kontext zur Beobachtung von Hangrutschungsereignissen mit Spezialsensorik im Vordergrund. Der Mehrwert des konzipierten Informationssystems und die Verbesserung gegenüber klassischen Blackbox-artigen Systemdesigns sind aufgrund des Zugewinns an Flexibilität deutlich zu erkennen. Auch bei der Einbindung von Sensorsystemen in einen fachübergreifenden Anwendungskontext, wie bei der Kooperation im ‚Geotechnologien‘-Rahmenprogramm gezeigt, überwiegen die entstehenden Mehrwerte den anfallenden Mehraufwand der entsprechend notwendigen spezifischen Systemabstimmungen. Aus Sicht des Autors ist der Nutzen der SWE-Technologie besonders dann hervorzuheben, wenn der Wert von gesammelten Umweltinformationen über aktive Projektlaufzeiten hinaus bewahrt werden soll. Besonders in Forschungsprojekten besteht die häufige Herausforderung, spezifische Anwendungen und Da-

tenhaltungen über längere Zeit operabel zu halten, da meist in Form von Personalressourcen vorliegendes Know-how nicht uneingeschränkt zur Verfügung steht. Trotz entsprechender Defizite der ersten SWE-Generation stellt die Technologie ein wichtiges Rahmenwerk dar, um eine grundlegende Nachhaltigkeit zu gewährleisten.

7.3. Offene Fragen

Verschiedene Aspekte von zukünftigen langzeitlichen Produktiveinsätzen des konzipierten Sensor- und Informationssystems konnten im Laufe der Projektlaufzeit nicht ausreichend untersucht werden und bleiben auch im Rahmen dieser Arbeit als Fragestellungen offen.

Aspekte der Systemleistung bzw. Performance der Nutzung von Prozessierungs- bzw. Kommunikationsressourcen müssen vor allem für großräumige Gebietsabdeckungen durch das Sensornetz berücksichtigt werden. Während freie Skalierbarkeit nach Angaben des Herstellers ScatterWeb auf Seiten des Sensornetzes gewährleistet ist, muss eine entsprechende Ausweitung auf Seiten der Dienste- und Anwendungsebene berücksichtigt werden. Erste Anhaltspunkte liefern mittelfristige Dauerläufer in Form von Testnetzen. Über den Zeitraum von drei Monaten übermittelte ein Testnetzwerk des Projektpartners LIH, bestehend aus drei bis fünf dauerhaft übertragenden Sensorknoten, ca. zwei Millionen Beobachtungsdatensätze an die SOS-Datenhaltung nach Rostock. Heruntergerechnet entspricht dies dem durchschnittlichen Datenaufkommen von 15 Messungen pro Minute bzw. 0,25 Messungen pro Sekunde. Arbeiten bezüglich Laststudien (Müller et al., 2011) zeigen Kapazitäten bei Dateneinbringung (Sensorsystem zu SOS) und Datenabruf (SOS zu Client), die selbst bei massiver Skalierung des Sensornetzes den Anforderungen des Projekts genügen sollten. Auch bei einer Berücksichtigung aller in dieser Arbeit beschriebener Prozesse zwischen Sensornetz bzw. Controller-Ebene und SOS/SAS müssten, im Rahmen der Leistungsfähigkeit moderner Server- und Netzwerkressourcen, der Umgang mit vielen tausend Sensorknoten problemlos möglich sein. Etwaige Leistungseinbußen bezüglich eines entstehenden Overhead bei der Nutzung von HTTP und XML wurden im Rahmen der Studie als vernachlässigbar eingestuft. Einziger problematischer Flaschenhals ist aus diesem Grund vor allem im Bereich der Übermittlung von einer energielimitierten und über Funknetz (GSM, UMTS, LTE) angebundenen Feldinstallation zum Gatewayserver zu sehen.

Sicherheitsaspekte bezüglich Abhörsicherheit und unbefugtem Zugriff wurden im Rahmen der Projektarbeiten nur geringfügig berücksichtigt. Verbindungen zwischen Sensorsystem und Diensteebene wurden wo möglich und im Rahmen der Verhältnismäßigkeit mit einer *Secure Sockets Layer*-Verschlüsselung (SSL) versehen. Besondere Aufmerksamkeit gegenüber Zugriffsmissbrauch muss vor allem auf die Zugänglichkeit der Dienste der Geodateninfrastruktur gelegt werden. Ausführliche Abhandlungen zum Thema Dienstesicherheit liegen in Form von Arbeitsberichten des OGC vor (OGC, 2009a) und sollten je nach Anforderungen in zukünftige Implementierungen einfließen.

Aspekte der Ausfallsicherheit von Diensten im Ablauf der Frühwarnkette müssen ebenfalls in zukünftigen Arbeiten berücksichtigt werden, können durch das flexible Konzept des Informationssystems aber bereits grundsätzlich abgedeckt werden. Der im Aufbau der verschiedenen Analyseebenen vorgesehene Einsatz multipler SOS- und SAS Instanzen kann auf verschiedene physische Servereinheiten verteilt werden. Datenhaltungen können zusätzlich redundant erfolgen, indem z.B. Backups in regelmäßigen Abständen auf andere Instanzen gespiegelt werden. So entstehende Backup-Dienste können als Ausweichquelle in der Anwendungslogik der Analyseprozesse hinterlegt werden. Ausbleibende Prozessanstoßungen durch die ereignisbasierte Benachrichtigung des SAS könnten durch Pflichtabrufe der Prozesse in festzulegenden zyklischen Abständen durchgeführt werden.

Trotz Relevanz im SWE-Konzept wurde von einem Einsatz des Sensor Planning Service (SPS) im Rahmen des Projekts abgesehen. Obwohl Möglichkeiten zur bidirektionalen Kommunikation und Fernwartung bzw. Steuerung des großteils autonom agierenden Sensornetzes bestehen, wurde eine entsprechende Verbindung mit einem SPS aus Gründen der Konfigurationssensibilität und Fehleranfälligkeit als nicht praktikabel eingestuft. Zukünftige Implementationen könnten eine evtl. Umsetzung unter Einbeziehung notwendiger Kontrollmechanismen und Logik zur Wahrung von Energie- und Kommunikationsressourcen ermöglichen. Weiterhin könnte das vorgestellte Konzept der virtuellen Sensorinstanzen, basierend auf den Analyseebenen des Informationssystems, durch Anbindung über SPS-Schnittstellen erweitert werden.

7.4. Abschließender Ausblick

Die andauernden Arbeiten der SWE-Initiative, wie auch alle weiteren Standardisierungsbemühungen innerhalb und außerhalb des OGC stellen einen wichtigen Eckpunkt zur Verbindung der räumlichen Datenverarbeitung mit der Umweltforschung und ihrer unabdingbaren Integration in das Semantic Web der Zukunft dar. Die darin ermöglichte automatisierte Wissensorganisation soll die anhaltende Informationsrevolution weiter anschieben und zu einer neuen Qualität der Nutzbarmachung von Informationen verhelfen. Fortschritte wie diese sowie die fortlaufende Evolution von Mikroelektronik in Verbindung mit neuartigen Energiequellen (Gur et al., 2012) haben das Potential, die bereits vor Jahren angedachte elektronische Haut der Erdoberfläche (Gore, 1998) zur Nutzung als anwendungsübergreifendes Makroinstrument Realität werden zu lassen. Die in dieser Arbeit beschriebenen Bemühungen zu Abstrahierung und interoperablen Nutzbarmachung moderner spezialisierter Sensortechnik stellt dazu einen ersten Schritt dar. Andauernde Diskussionen (Arctur, 2011) zeigen jedoch auch, dass sich „klassische“ Ansätze der vereinheitlichenden kollaborativen Standardisierung auch gegenüber Trends der „Massenware Daten“ (Big Data) positionieren sollten. Die Anwendungsbereiche beider Methoden sind grundsätzlich voneinander getrennt, dennoch sind es in jüngster Vergangenheit oft die nicht vereinheitlichten de facto-Ansätze (Geotagging, Crowdsourcing, Karten-Mashups, Soziale

Netzwerke etc.), die die räumliche Datenverarbeitung durch Initialschübe auf gesamter Breite vorangebracht haben. Zwar sind „scharfe“ und „unscharfe“ Ansätze der räumlichen Datenverarbeitung auf vielen Ebenen nicht vereinbar, dennoch könnte die Orientierung an intuitiven und anwenderfreundlichen Big Data-Anwendungen (wie z.B. Pachube) auch den Standardisierungsbemühungen Mehrwerte durch eine breitere Akzeptanz in nicht spezialisierten Anwenderbereichen verschaffen.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Kapitelaufbau	5
Abbildung 2: Projektstruktur mit den zentralen Projektbereichen und den verantwortlichen Projektpartnern (SLEWS, 2011)	13
Abbildung 3: Übersicht verwendeter Sensorgruppen mit Sensoren (SLEWS, 2011)	16
Abbildung 4: SLEWS-Sensorknoten (SLEWS, 2011)	18
Abbildung 5: Aufbau und Organisation des SLEWS-Sensornetzes (SLEWS, 2011)	18
Abbildung 6: Schichtenmodell der Vernetzung von Sensoren von der Hardware- bis zur Anwendungsebene	27
Abbildung 7: Vision der SWE-Initiative zur Vernetzung von Sensordaten (OGC, 2007)	28
Abbildung 8: Sequenzdiagramm der Datenabfrage zwischen Anwendung und SOS30	
Abbildung 9: Übersicht der Prozessmodellierung in SensorML mit Beispielen (nach OGC, 2007c)	33
Abbildung 10: Beispiel der Modellierung einer Messbeobachtung (<i>observation</i>) in O&M (http://www.ogcnetwork.net/sos_2_0/tutorial/om)	34
Abbildung 11: Einsatzort des SLEWS-Feldtests bei Rathen im Nationalpark Sächsische Schweiz (SLEWS, 2011)	37
Abbildung 12: Formulierten Anforderungen abgebildet auf die Funktionsbereiche des EVAP-Modells	40
Abbildung 13: Wasserfallmodell der Datenfusion nach Harris et al., 1998 (Esteban et al., 2005, S.15)	41
Abbildung 14: Plausibilitätsprüfung durch Sensor-/Datenfusion mithilfe verteilter Sensorknoten (SLEWS, 2011)	42
Abbildung 15: Plausibilitätsprüfung durch Sensor-/Datenfusion mithilfe verschiedener Detektoren eines Sensorknotens (SLEWS, 2011)	42
Abbildung 16: Übergang der Kommunikationskette eines Frühwarnsystems von der technischen in die soziale Informationsbereitstellung (SLEWS, 2011)	43
Abbildung 17: Systementwurf mit Funktionsbereichen des SLEWS-Frühwarnsystems (Bereiche „Sensornetz“ und „Geodateninfrastruktur“ = Funktionspflichtumfang) ..	45
Abbildung 18: Technischer Ablauf der Datenbereitstellung über die GDI	48
Abbildung 19: Controller-Modul auf dem Gatewayserver zur Datenvermittlung zwischen Sensornetz und externen Anwendungen (SLEWS, 2011)	50
Abbildung 20: Prinzip der sensorseitigen Formalisierung von Rohdaten zum Eintrag in eine SWE-basierte Diensteebene (WSN = Wireless Sensor Network)	56
Abbildung 21: Prinzip der diensteseitigen Formalisierung von Rohdaten zum Eintrag in eine SWE-basierte Diensteebene (WSN = Wireless Sensor Network)	57
Abbildung 22: Vermittlung von Daten diverser Quellen an unterschiedliche SOS-Instanzen über eine zentrale Feeder-Anwendung	58

Abbildung 23: Prinzip der diensteseitigen Formalisierung unter Nutzung des Feeder-/SWE Connector-Prinzips (WSN = Wireless Sensor Network).....	59
Abbildung 24: Umsetzung einer diensteseitigen Formalisierung von Rohdaten im Funktionsbereich des SOS.....	61
Abbildung 25: Umsetzung einer diensteseitigen Formalisierung von Rohdaten unter Nutzung einer SWE Connector-Anwendung	63
Abbildung 26: Datenbankschema des 52° North Sensor Observation Service V 3.0.1 (nach 52°North, 2011).....	66
Abbildung 27: Hierarchie Sensornetz←Sensorknoten←Detektor bei der Erfassung in	72
Abbildung 28: Abgestufte Kommunikationsmodi zwischen Anwender und Informationssystem (SLEWS, 2011)	84
Abbildung 29: Kommunikationsablauf zwischen Anwendungsebene bzw. Sensornetz und SAS am Beispiel des SLEWS-Informationssystems	88
Abbildung 30: Einbezug von Fachanwendungen zur Bewegungs-/Hangrutschungsanalyse in das SLEWS-Informationssystem	91
Abbildung 31: Entscheidungsdiagramm der Plausibilitätsprüfung und Erkennung eines Bewegungsereignisses durch die Anwendung „Bewegung“	93
Abbildung 32: Browser-basierter SLEWS SOS-Client unter Verwendung des OpenLayers-Framework	97
Abbildung 33: Interpolierte Heatmap bzw. Shakemap von Messungen zur Bodenbeschleunigung unter Einbeziehung des SLEWS-SOS (Quelle: EWS Transport, 2009).....	98
Abbildung 34: SOS-Client zur Zeitreihenanalyse von Messdaten auf Basis von Matlab	99
Abbildung 35: Flexible Informationsorchestrierung in einem Frühwarnszenario unter Verwendung des SLEWS-Informationssystems (W*S = Web Map/Feature/Coverage Service)	101
Abbildung 36: Vergleich des Verhältnisses Detailumfang ↔ Aussagequalität entlang einer Frühwarnkette in klassischen und SWE-basierten Frühwarnsystemen.....	103
Abbildung 37: Einbindung von Wetterstationen über einen externen SOS der Firma Terrestris GmbH in eine SLEWS-Visualisierungsanwendung.....	104
Abbildung 38: Earthquake Early Warning Simulator unter Einbeziehung des SLEWS-SOS (rote Markierung, Quelle: EWS Transport, 2009)	105
Abbildung 39: Konzept zur ad hoc-Informationsorchestrierung von Diensten im Frühwarnbereich	107

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Kriterien der Forschungsansätze von Projekten im Bereich gravitative Massenbewegungen. (✓ = umgesetzt, ○ = bedingt umgesetzt, -- = nicht umgesetzt)	11
Tabelle 2: Eignung von Sensorarten hinsichtlich zu beobachtender Bewegungsarten von Hangrutschungen (GPS = Global Positioning System, UWB = Ultra Wide Band)	15
Tabelle 3: Übersicht der SWE-Dienstespezifikationen (Stand 1. Quartal 2012)	28
Tabelle 4: Übersicht der SWE-Formatspezifikationen (Stand 1. Quartal 2012)	32
Tabelle 5: Beispiel für die Erweiterung und Zuordnung von Identifikatoren des Messdatenpakets <code>1008 2011-09-13#17:13:10 INCL -4.905 -5.735[...]</code>	52
Tabelle 6: observation phenomenon offering am Beispiel Beschleunigung (komplex) und Druck (einfach)	69

Listing-Verzeichnis

Listing 1: Rohdaten des Sensornetzes vom Gateway	50
Listing 2: Funktion zur Umwandlung/Kalibrierung von Hangneigungswerten von Hexadezimal- zu Zahlenwerten der Einheit Grad (°)	51
Listing 3: O&M observation mit komplexer Codierung des Beobachtungsphänomens <code>urn:ogc:def:phenomenon:SLEWS:2010:2Dinclination</code>	53
Listing 4: O&M observations mit zwei einfachen Codierungen des Beobachtungsphänomens <code>urn:ogc:def:phenomenon:EDCS:2005:plane_angle</code>	54
Listing 5: Aktualisierung von Zeitintervallen verknüpfter Tabellen bei INSERT von neuen Datensätzen in Tabelle observation im PostGIS-Datenbanksystem des SOS	62
Listing 6: O&M-basierte Codierung einer <i>InsertObservation</i> -Anfrage an einen transaktionalen SOS (SOS-T)	63
Listing 7: SQL-basierte Insert-Anfrage an das PostGIS-Datenbanksystem eines SOS	64
Listing 8: Auszug aus dem GetCapabilities-Dokument des SLEWS-SOS (<i>offering ATM_PRESSURE</i>)	68
Listing 9: Übersichtsprofil des Aufbaus einer SensorML-Beschreibung eines SLEWS-Sensorknotens	74
Listing 10: Auszug der SensorML-Beschreibung eines SLEWS-Sensorknotens (Bereiche Metabeschreibung und Position)	75

Listing 11: Auszug der SensorML-Beschreibung eines SLEWS-Sensorknotens (System-Inputs und -Outputs)	76
Listing 12: Auszug der SensorML-Beschreibung eines SLEWS-Sensorknotens (Detektorbeschreibung).....	77
Listing 13: Informationscodierung der <i>Advertise</i> -Operation zur Registrierung eines Sensors bzw. Datenkanals am SAS.....	86
Listing 14: Informationscodierung der <i>Subscribe</i> -Operation zur Registrierung eines Nutzers am SAS.....	87

Literaturverzeichnis

- 52° North Initiative for Geospatial Open Source Software GmbH (2008): Integration of different data sources into 52N SOS. URL: http://www.gi-tage.de/archive/2008/downloads/Material/geosensornetworks/52N_SWE_SOS_Feder.pdf (letzter Zugriff 14.03.2012)
- 52° North Initiative for Geospatial Open Source Software GmbH (2011): Sensor Observation Service. URL: <http://52north.org/downloads/sensor-web/sos/52n-sensorweb-sos-320-binary> (letzter Zugriff 14.03.2012)
- Arctur, D. (2011): Big Data vs SDI? It's not an either/or. URL: <http://www.opengeospatial.org/node/1492#comments> (letzter Zugriff 14.03.2012)
- Arduino (2012): Arduino Homepage. URL: <http://www.arduino.cc/>
- Arnhardt, C., Fernandez-Steege, T.M., Azzam, R. (2010): Sensor Fusion of Position- and Micro-Sensors (MEMS) integrated in a Wireless Sensor Network for movement detection in landslide areas. In: General Assembly of the European Geosciences Union 2010, May 02-07. 2010, Vienna (Austria). Geophysical Research Abstracts , Vol. 12 (EGU2010-8828)
- Bacharach, S. (2007): New Implementations of OGC Sensor Web Enablement Standards, Sensors, 2007-12-01. URL: <http://www.sensorsmag.com/networking-communications/government-military/new-implementations-ogc-sensor-web-enablement-standards-1437> (letzter Zugriff 14.03.2012)
- Bauer, M. (2003): Vermessung und Ortung mit Satelliten / mit Beiträgen von Lambert Wanninger . 5., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Heidelberg: Herbert Wichmann Verlag
- Baum, R. L. (2007): Landslide Warning Capabilities in the United States– 2006. In: Proceedings of the 1st North America Landslide Conference, Vail, Colorado, June 3–8 2007. Association of Engineering Geologists Special Publication 23. CD-ROM
- Bell R., Mayer J., Pohl J., Greiving S. & Glade T. (eds) (2010): Integrative Frühwarnsysteme für gravitative Massenbewegungen (ILEWS) - Monitoring, Modellierung, Implementierung. Klartext Verlag, Essen
- Bermudez, L., Bogden, P., Bridger, E., Creager, G., Forrest, D., Graybeal, J. (2006): Toward an Ocean Observing System of Systems. In Proceedings of OCEANS 2006, Boston, MA, USA, September 2006; IEEE: New York, NY, USA pp. 1–4

- Bill, R. (2010): Grundlagen der Geo-Informationssysteme, 5. Auflage, Wichmann Verlag, Heidelberg, 2010, ISBN 3-87907-489-5, 809 Seiten
- Bill, R., Cap, C., Kofahl, M., Mundt, T. (2004): Indoor and outdoor positioning in mobile environments - a review and some investigations on WLAN positioning. In: Geographic Information Sciences Volume 10, Nr. 2, S. 91 – 98
- Biocatastrophe Blog (2011): Japan withheld nuclear radiation data, leaving evacuees in peril. URL: <http://biocatastrophe.blogspot.de/2011/08/japan-withheld-nuclear-radiation-data.html> (letzter Zugriff 14.03.2012)
- Bizer, C., Heath, T., Berners-Lee, T. (2009): Linked Data - The Story So Far", International Journal on Semantic Web and Information Systems 5. URL: <http://tomheath.com/papers/bizer-heath-berners-lee-ijswis-linked-data.pdf> (letzter Zugriff 14.03.2012)
- Blankenbach, J., Norrdine, A., Schlemmer, H., Willert, V. (2007): Indoor-Positionierung auf Basis von Ultra Wide Band. In: AVN Allgemeine Vermessungsnachrichten, S.169 – 178
- Blikra, L. H. (2008): The Åknes rockslide. Monitoring, threshold values and early-warning. In: CHEN, Z., Zhang, J., Li, Z., Wu, F. und K. Ho (Hrsg.): Landslides and Engineered Slopes. From the Past to the Future. Proceedings of the 10th International Symposium on Landslides and Engineered Slopes, 30 June–4 July 2008, Xi'an, China. London. Band 2. S. 1089–1094
- Bloomberg, J. (2004): Implementation Framework: The future of service-oriented architecture Software is an excellent reference on SOA. URL: <http://www.zapthink.com/2004/04/13/the-soa-implementation-framework/> (letzter Zugriff 14.03.2012)
- Bleier, T., Bozic, B., Bumerl-Lexa, R., Da Costa, A., Costes, S., Iosifescu, I.; Martin, O., Frysinger, S., Havlik, D., Hilbring, D., Jacques, P., Klopfer, M., Kunz S., Kutschera, P., Lidstone, M., Middleton, S., Roberts, Z., Sabeur, Z., Schabauer, J., Schlobinski, S., Shu, T., Simonis, I., Stevenot, B., Usländer, T., Watson, K., Wittamore, K. (2009) SANY-An Open Service Architecture for Sensor Networks. URL: <http://www.tatoo-fp7.eu/tatooweb/biblio/sany-open-service-architecture-sensor-networks> (letzter Zugriff 14.03.2012)
- Breunig, M., Schilberg, B., Kuper, P. V., Jahn, M., Reinhardt, W., Nuhn, E., Mäs, S., Boley, C., Trauner, F.-X., Wiesel, J., Richter, D., Abecker, A., Gallus, D., Kazakos, W. und A. Bartels (2009): EGIF – Developing Advanced GI Methods for Early Warning in Mass Movement Scenarios. In: STROINK, L. (Hrsg.): GEOTECHNOLOGIEN Science Report 13. Early Warning Systems in Earth Management, S.49–72

- Bröring, A., Echterhoff, J., Jirka, S., Simonis, I., Everding, T., Stasch, C., Liang, S., Lemmens, R. (2011): New Generation Sensor Web Enablement. *Sensors* 2011, 11, 2652-2699. URL: <http://www.mdpi.com/1424-8220/11/3/2652/> (letzter Zugriff 14.03.2012)
- Brooks, S. M., Crozier, M. J., Glade, T. W. & Anderson, M. G. (2004): Towards establishing climatic thresholds for slope stability. In: *Pure and Applied Geophysics*. 161, 881-905
- Chung Lan-Kun, Yao-Min Fang, Yin-Huei Chang, Tien-Yin Chou, Lee, B.J., Hsiao-Yuen Yin, Baranski, B. (2009): "A SOA based debris flow monitoring system," *Geoinformatics, Proceedings 2009 17th International Conference on*, pp.1-6
- Crossbow (2012), Gateway Middleware. URL: <http://bullseye.xbow.com:81/Technology/GatewayMiddleware.aspx> (letzter Zugriff 14.03.2012)
- Deegree (2011): Deegree 3 Sensor Observation Service. URL: <http://wiki.deegree.org/deegreeWiki/deegree3/SensorObservationService> (letzter Zugriff 14.03.2012)
- Delin, K. (2002). The Sensor Web: A macro-instrument for coordinated sensing. In: *Sensors, Molecular Diversity Preservation International*, Vol. .2, S. 270-285
- Egenhofer, M. (2002): Toward the Semantic Geospatial Web. In: *10th ACM International Symposium on Advances in Geographic Information Systems (ACM-GIS)*, McLean, VA, pp. 1–4
- Egger, P. und V. Mair (2009): Innovative Maßnahmen zur Gefahrenreduktion am Beispiel Grissianerbach. In: *Journal für Wildbach-, Lawinen-, Erosion- und Steinschlagschutz* 161
- Esteban, J., Starr, A., Willetts, R., Hannah P. and Bryanston-Cross, P. (2005): A Review of data fusion models and architectures: towards engineering guidelines. *Neural Comput. Appl.* 14, 4 (December 2005), 273-281
- EWS Transport (2009): Earthquake Early Warning Simulator. URL: <http://www.ews-transport.de/servlet/is/7520/> (letzter Zugriff 14.03.2012)
- Fielding, R. (2000): Architectural Styles and the Design of Network-based Software Architectures. URL: <http://www.ics.uci.edu/~fielding/pubs/dissertation/top.htm> (letzter Zugriff 14.03.2012)

- GDI-DE (2007): Architektur der Geodateninfrastruktur Deutschland Version 1.0. URL: http://www.geoportal.de/SharedDocs/Downloads/DE/GDI-DE/GDI-DE%20Architekturkonzeptv1.pdf?__blob=publicationFile (letzter Zugriff 14.03.2012)
- Gigan, G., Atkinson, I. (2007): Sensor Abstraction Layer: A Unique Software Interface to Effectively Manage Sensor Networks. In Proceedings of 3rd International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information. ISSNIP 2007, Melbourne, Australia, December 2007; pp. 479–484
- Gore, A. (1998): The Digital Earth: Understanding our planet in the 21st Century. URL: http://portal.opengeospatial.org/files/?artifact_id=6210&version=1&format=pdf (letzter Zugriff 14.03.2012)
- GSDI (2009): Spatial Data Infrastructure Cookbook. URL: http://memberservices.gsdi.org/files/?artifact_id=655 (letzter Zugriff 14.03.2012)
- Grenzdörfer, G., Bill, R. (2010): Unmanned Airborne Systems (UAS) – moderne und flexible Geodatenerfassung. In: GIS-Report 2010/2011. Bernhard Harzer Verlag. URL: www.geobranchen.de/images/stories/produkte/gr_1011_web1.1.pdf (letzter Zugriff 14.03.2012)
- GeoCENS (2012): Geospatial Cyberinfrastructure for Environmental Sensing. URL: <http://www.geocens.ca/> (letzter Zugriff 14.03.2012)
- Gur, I., Sawyer, K., Prasher, R. (2012): Searching for a Better Thermal Battery. In: Science 23 March 2012: 335 (6075), 1454-1455
- Harris C. J., Bailey A. & Dodd, T. J. (1998): Multi-sensor data fusion in defence and aerospace. Aeronautical Journal. 102 (1015): 229-244
- Heier, C. und Spies, K.-H.: Standardisierte Integration von Sensoren und Messreihen in eine wasserwirtschaftliche Geodateninfrastruktur zur Optimierung des operativen Hochwassermanagements, in: Reinhardt, W., Krüger, A., Ehlers, M. (Hrsg.) (2009): Geoinformatik 2009. 31. März - 02. April 2009, Osnabrück. Konferenzband. Schriftenreihe des Instituts für Geoinformatik, Westfälische Wilhelms-Universität Münster. Band 35. S. 181-186
- Jäger, R. (2008): GOCA - GNSS/LPS/LS-based online Control and Alarm System. URL: http://www.goca.info/index_de.html (letzter Zugriff 14.03.2012)
- Janowicz, K., Bröring, A., Stasch, C., Schade, S., Everding, T and Llaves, A. (2011): A RESTful Proxy and Data Model for Linked Sensor Data. URL: <http://geog.ucsb.edu/~jano/RESTfulSOS.pdf> (letzter Zugriff 14.03.2012)

Kahmen, H. (2006): Vermessungskunde. 20. völlig neu bearb. Aufl., Berlin: Walter de Gruyter

Keefer, D. K., Wilson, R. C., Mark, R. K., Brabb, E. E., Brown, W. M. III, Ellen, S. D., Harp, E. L., Wieczorek, G. F., Alger, C. S. und R. S. Zatkun (1987): Real-time landslide warning during heavy rainfall. In: Science 238. H. 13. S. 921–925

Koordinierungsbüro Geotechnologien (2010): Zukunftssicherung für Mensch und Erde: Konzeption zur Weiterentwicklung des geowissenschaftlichen Forschungs- und Entwicklungsprogramms GEOTECHNOLOGIEN des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) und der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG). URL: <http://www.geotechnologien.de/portal/cms/Geotechnologien/Ressourcen/Docs/Publikationen/Programmschrift+deutsch?binary=true&status=300&language=de> (letzter Zugriff 14.03.2012)

Korduan, P. (2011): Serviceorientiertes Design für Internet-GIS. In: Bill, R., Flach, G., Klammer, U., Lerche, T.: GeoForum MV 2011 – Drehscheibe für Wirtschaft und Verwaltung. Berlin : GITO Verlag, S. 149 - 155

Krauter, E., Feuerbach, J., Lauterbach, M. (2004): Risikoabschätzung von Hangbewegungen und Schutzkonzepte.- In.: 10. Internationales Symposium Interpraevent 2004, Riva del Garda / Trient

Kümpel, H.-J, Balzer, D., Kühn, F. (2011): Verringerung von Georisiken durch Geomonitoring. URL: http://www.geomonitoring.org/Tagung2011/Abstracts/Abstract_Kuempel.pdf (letzter Zugriff 14.03.2012)

Laptopmag (2011) Intel's Fireball Sensor Goes Where First Responders Can't, Reports Back to Your Phone. URL: <http://blog.laptopmag.com/intels-fireball-sensor-goes-where-first-responders-cant-reports-back-to-your-phone> (letzter Zugriff 14.03.2012)

Liang, S. H., Croitoru, A. & Tao, C. V. (2005). A distributed geospatial infrastructure for Sensors. In: *Computers & Geosciences*, 31, 221 - 231

Llinas, J. & Hall, D. L. (1998): An introduction to multi-sensor data fusion. Proc. IEEE International Symposium on Circuits and Systems 1998, 6: 537-540

Luhmann, T. (2003): Nahbereichsphotogrammetrie - Grundlagen, Methoden und Anwendungen. 2. überarb. Aufl. Heidelberg: Wichmann Verlag

- Ramesh, M. V. (2009): Real-time Wireless Sensor Network for Landslide Detection. In: Proceedings of the 2009 Third International Conference on Sensor Technologies and Applications, July 2009. URL: <http://www.winsoc.org/pdf/SENSORCOMM%202009%20IEEE%20format.pdf> (letzter Zugriff 14.03.2012)
- Mapserver (2007): SOS Server URL: http://mapserver.org/ogc/sos_server.html (letzter Zugriff 14.03.2012)
- MMI (2007): Marine Metadata Interoperability. URL: <http://marinemetadata.org/community/teams/ont/ogcowlharmonization/ontrep> (letzter Zugriff 14.03.2012)
- Munich Re (2012): Pressemitteilung Naturkatastrophen-Bilanz 2011. URL: http://www.munichre.com/de/media_relations/press_releases/2012/2012_01_04_press_release.aspx (letzter Zugriff 14.03.2012)
- Niemeier, W. (2011): Stand und Entwicklungstendenzen für das "Geometrische Monitoring" von kleinräumigen Objekten. URL: http://www.geo-monitoring.org/Tagung2011/Abstracts/Abstract_Niemeier.pdf (letzter Zugriff 14.03.2012)
- NIST (2011): Introduction to IEEE P1451. URL: <http://www.nist.gov/el/isd/ieee/1451intro.cfm> (letzter Zugriff 14.03.2012)
- Mell, P., Grance, T. (2009): The NIST Definition of cloud computing. URL: <http://www.slideshare.net/crossgov/nist-definition-of-cloud-computing-v15> (letzter Zugriff 14.03.2012)
- Müller, R., Fabritius, M., Mock, M. (2011): An OGC compliant Sensor Observation Service for mobile sensors. Advancing Geoinformation Science for a Changing World, Springer Berlin Heidelberg, 1, 163-184
- OASIS (2006) Reference Model for Service Oriented Architecture 1.0, Committee Specification 1. URL: http://www.oasis-open.org/committees/tc_home.php?wg_abbrev=soa-rm (letzter Zugriff 14.03.2012)
- OASIS (2006b): OASIS Web Services Notification (WSN). URL: http://www.oasis-open.org/committees/tc_home.php?wg_abbrev=wsn (letzter Zugriff 14.03.2012)
- OGC (2002): Units of Measure Use and Definition Recommendations http://portal.opengeospatial.org/files/?artifact_id=11498 (letzter Zugriff 14.03.2012)
- OGC (2004): Geospatial Portal Reference Architecture. URL: http://portal.opengeospatial.org/files/?artifact_id=6669 (letzter Zugriff 14.03.2012)

- OGC (2005): OpenGIS Web Map Context Implementation Specification. URL:
<http://www.opengeospatial.org/standards/wmc> (letzter Zugriff 14.03.2012)
- OGC (2005a): The Importance Of Going Open. URL:
http://portal.opengeospatial.org/files/?artifact_id=6211&version=2&format=pdf
(letzter Zugriff 14.03.2012)
- OGC (2005b): Web Map Context Documents. URL:
http://portal.opengeospatial.org/files/?artifact_id=8618 (letzter Zugriff 14.03.2012)
- OGC (2006): Sensor Alert Service Candidate Implementation
Specification Version 0.9.0.URL:
http://portal.opengeospatial.org/files/?artifact_id=15588 (letzter Zugriff 14.03.2012)
- OGC (2006a): Web Notification Service Implementation
Specification Version 0.0.9. URL:
http://portal.opengeospatial.org/files/?artifact_id=18776 (letzter Zugriff 14.03.2012)
- OGC (2007): White Paper: Sensor Web Enablement: Overview And High Level Architecture. URL: http://portal.opengeospatial.org/files/?artifact_id=25562 (letzter Zugriff 14.03.2012)
- OGC (2007a): Sensor Observation Service Version 1.0. URL:
http://portal.opengeospatial.org/files/?artifact_id=26667 (letzter Zugriff 14.03.2012)
- OGC (2007b): Sensor Planning Service Implementation
Specification Version 1.0 .URL:
http://portal.opengeospatial.org/files/?artifact_id=23180 (letzter Zugriff 14.03.2012)
- OGC (2007c): Sensor Model Language (SensorML) Implementation Specification
Version 1.0.0. URL: http://portal.opengeospatial.org/files/?artifact_id=21273 (letzter Zugriff 14.03.2012)
- OGC (2007d): Observations and Measurements - Part 1 - Observation schema Version 1.0. URL: http://portal.opengeospatial.org/files/?artifact_id=22466 (letzter Zugriff 14.03.2012)
- OGC (2008): A URN namespace for the Open Geospatial Consortium. URL:
http://portal.opengeospatial.org/files/?artifact_id=27357 (letzter Zugriff 14.03.2012)
- OGC (2008a): Sensor Event Service Interface Specification. URL:
http://portal.opengeospatial.org/files/?artifact_id=29576 (letzter Zugriff 14.03.2012)

- OGC (2008b): A URN namespace for the Open Geospatial Consortium. URL:
http://portal.opengeospatial.org/files/?artifact_id=27357 (letzter Zugriff 14.03.2012)
- OGC (2009): Definition identifier URNs in OGC namespace. URL
http://portal.opengeospatial.org/files/?artifact_id=30575 (letzter Zugriff 14.03.2012)
- OGC (2009a): OWS-6 Secure Sensor Web Engineering Report URL:
http://portal.opengeospatial.org/files/?artifact_id=34273 (letzter Zugriff 14.03.2012)
- OGC (2009b): OWS-6 SensorML Profile for Discovery Engineering Report. URL: 09-033_OWS-6_SensorML_Profile_for_Discovery_Engineering_Report (letzter Zugriff 14.03.2012)
- OGC (2009c): Definition identifier URNs in OGC namespace. URL:
http://portal.opengeospatial.org/files/?artifact_id=30575 (letzter Zugriff 14.03.2012)
- OGC (2010): OpenGIS Sensor Interface Descriptors. URL:
http://portal.opengeospatial.org/files/?artifact_id=39664 (letzter Zugriff 14.03.2012)
- OGC (2010a): OpenGIS Filter Encoding 2.0 Encoding Standard. URL:
http://portal.opengeospatial.org/files/?artifact_id=39968 (letzter Zugriff 14.03.2012)
- OGC (2010b): Sensor Interface Descriptors URL:
http://portal.opengeospatial.org/files/?artifact_id=39664 (letzter Zugriff 14.03.2012)
- OGC (2010c): Catalogue Services Specification 2.0 Extension Package for ebRIM Application Profile: SensorML. URL:
http://portal.opengeospatial.org/files/?artifact_id=37944 (letzter Zugriff 14.03.2012)
- OGC (2010d): OGC Identifiers – the case for http URIs. URL:
https://portal.opengeospatial.org/files/?artifact_id=39467 (letzter Zugriff 14.03.2012)
- OGC (2010e): Sensor Observable Registry (SOR) Discussion Paper. URL:
http://portal.opengeospatial.org/files/?artifact_id=40571 (letzter Zugriff 14.03.2012)
- OGC (2010f): Sensor Instance Registry Discussion Paper. URL:
http://portal.opengeospatial.org/files/?artifact_id=40609 (letzter Zugriff 14.03.2012)
- OGC (2010g): Draft for Candidate OpenGIS Web 3D Service Interface Standard. URL: http://portal.opengeospatial.org/files/?artifact_id=36390 (letzter Zugriff 14.03.2012)
- OGC (2010h): URL: Summary of the OGC Web Services, Phase 7 (OWS-7)

Interoperability Testbed. URL:

https://portal.opengeospatial.org/files/?artifact_id=40840 (letzter Zugriff 14.03.2012)

OGC (2011): Sensor Web Enablement Software. URL:

http://www.ogcnetwork.net/SWE_Software (letzter Zugriff 14.03.2012)

OGC (2011a): OGC Reference Model Version 2.1. URL:

<http://www.opengeospatial.org/standards/orm> (letzter Zugriff 14.03.2012)

OGC (2011b): OGC Event Service - Review and Current State. URL:

https://portal.opengeospatial.org/files/?artifact_id=45850 (letzter Zugriff 14.03.2012)

OGC (2011c): Sensor Web Enablement Software. URL:

http://www.ogcnetwork.net/SWE_Software (letzter Zugriff 14.03.2012)

OGC (2011d): OGC OWS Context. URL: <http://www.ogcnetwork.net/context> (letzter Zugriff 14.03.2012)

OGC (2012): OGC PUCK Protocol Standard. URL:

<http://www.opengeospatial.org/standards/puck> (letzter Zugriff 14.03.2012)

OOSTethys (2012): Data Provider Cookbooks URL:

<http://www.oostethys.org/downloads> (letzter Zugriff 14.03.2012)

Ortigao, J. A. R., Justi, M. G., D'orso R. und H. Brito (2001): Rio-Watch the Rio de Janeiro landslide alarm system. In: HO, K. K. S. und K. S. LI (Hrsg.): Proceedings, 14th Southeast Asian Geotechnics Conference – Geo-technical Engineering: Meeting Society's Needs. Band 3, S. 237–241

OSM-3D (2012): URL: OSM-3D Project Homepage. URL: <http://www.osm-3d.org/map.htm> (letzter Zugriff 14.03.2012)

Pachube (2011): OGC – Pachube.

URL: https://portal.opengeospatial.org/?m=projects&a=view&project_id=110&tab=2&artifact_id=45687 (letzter Zugriff 14.03.2012)

PostgreSQL (2012): Das PostgreSQL-Rule System. URL:

<http://postgresql.de/download/PostgreSQL-Rules.pdf> (letzter Zugriff 14.03.2012)

PostgreSQL (2012a): PostgreSQL Triggers. URL:

<http://www.postgresql.org/docs/current/interactive/triggers.html> (letzter Zugriff 14.03.2012)

- Ramesh, M. V. (2009): Real-time Wireless Sensor Network for Landslide Detection. Proceeding 2009 Third International Conference on Sensor Technologies and Applications. URL: <http://www.winsoc.org/pdf/SENSORCOMM%202009%20IEEE%20format.pdf> (letzter Zugriff 14.03.2012)
- Saint-Andre P., Fletcher B. (2004): XEP-0127: Common Alerting Protocol (CAP) Over XMPP. URL: <http://xmpp.org/extensions/xep-0127.html> (letzter Zugriff 14.03.2012)
- Senatskommission für Geowissenschaftliche Gemeinschaftsforschung der Deutschen Forschungsgemeinschaft (2010): Dynamische Erde – Zukunftsaufgaben der Geowissenschaften. URL: http://www.sk-zag.de/Dynamische_Erde.html (letzter Zugriff 14.03.2012)
- Schuster, R. L. und L. M. Highland (2007): The Third Hans Cloos Lecture. Urban landslides: socioeconomic impacts and overview of mitigative strategies. In: Bulletin of Engineering Geology and the Environment 66. S. 1–27.
- Sheth, A., Tejaswi, K., Mehta, P., Parekh, C., Bansal, R., Merchant, S., Singh, T.; Desai, U.B., Thekkath, C.A., Toyama, K. (2005): SenSlide - A Sensor Network Based Landslide Prediction System. In: SenSys'05
- SLEWS (2011): Entwicklung einer Geodiensteinfrastruktur als Grundlage von Frühwarnsystemen für Massenbewegungen durch die Integration von Echtzeitsensorik. BMBF-Sonderprogramms GEOTECHNOLOGIEN Verbundprojekt „Frühwarnsysteme im Erdmanagement. Schlussbericht zu BMBF Förderkennzeichen 03G0662
- Spiegel Online (2010): Felssturz in Oberbayern. URL: <http://www.spiegel.de/panorama/0,1518,674106,00.html> (letzter Zugriff 14.03.2012)
- SZ Online (2009): Massiver Felssturz in der Sächsischen Schweiz. URL: <http://www.sz-online.de/nachrichten/artikel.asp?id=2161346> (letzter Zugriff 14.03.2012)
- Terzis, A., Anandarajah, A., Wang, I.-J., Moore, K. (2006): Slip Surface Localization in Wireless Sensor Networks for Landslide Prediction. In: IPSN 2006
- The New York Times (2010): Smart Dust? Not Quite, but We're Getting There URL: http://www.nytimes.com/2010/01/31/business/31unboxed.html?_r=1&adxnnl=1&adxnnlx=1332584051-o72g+HX2loJillIM5qvTPg (letzter Zugriff 14.03.2012)

Thuro, K., Wunderlich, T., Heunecke, O., Singer, J., Wasmeier, P., Schuh-Bäck, S., Festl, J. und J. Glabsch (2009): alpEWAS – The Aggenalm Landslide – Innovative Developments for an Effective Geo Sensor Network for Landslide Monitoring and Early Warning. In: Stroink, L. (Hrsg.): GEOTECHNOLOGIEN Science Report 13. Early Warning Systems in Earth Management. S. 33–48

Tacyniak, D. Ghirardelli, Y., Perez, O., Perez, R.F., Gonzalez, E., Bobis, J.M. (2008): OSIRIS: Combining Pollution Measurements with GPS Position Data for Air Quality Monitoring in Urban Environments Making Use of Smart Systems and SWE Technologies. In Proceedings of Sensing a Changing World 2008, Wageningen, The Netherlands, November 2008; Kooistra, L., Ligtenberg, A., Eds.; pp. 75–78

Raape, U., Tessmann, S., Wytzisk, A., Steinmetz, T., Wnuk, M., Hunold, M., Strobl, C., Stasch, C., Walkowski, A.C., Meyer, O., Jirka, S. (2009): Decision Support for Tsunami Early Warning in Indonesia: The Role of Standards. In Proceedings of Cartography and Geoinformatics for Early Warning and Emergency Management, Prague, Czech Republic, January 2009; Lecture Notes in Geoinformation and Cartography; Springer: Berlin, Germany, 2009; Volume 2, pp. 233–247

UC Technology (2012): Tsubuyaku Sensor. URL: http://www.uctec.com/html/release/tsubuyakucencer_20111212.pdf (letzter Zugriff 14.03.2012)

Universität Rostock (2008): Merkblatt zur Durchführung eines Promotionsverfahrens an der Agrar- und Umweltwissenschaftlichen Fakultät. URL: <http://www.uni-rostock.de/forschung/promotion/verfahrensweg-zur-promotion/merkblatt-zur-durchfuehrung-eines-promotionsverfahrens/> (letzter Zugriff 14.03.2012)

USGS (2011): U.S. Geological Survey Landslide Hazards Program. URL: <http://landslides.usgs.gov/> (letzter Zugriff 14.03.2012)

Varnes, D.J. (1978): Slope Movement Types and Processes.- In Special Report 176: Landslides: Analysis and Control (R.L. Schuster and R.J. Krizek, eds.), TRB, National Research Council, Washington D.C., pp. 11-33

Vector 1 Magazine (2011): European Environment Agency Embraces Sensors and Systems. URL: <http://www.vector1media.com/dialog/interviews/22169-european-environment-agency-embraces-sensors-and-systems.html> (letzter Zugriff 14.03.2012)

W3C (2004): Web Services Architecture. URL: <http://www.w3.org/TR/ws-arch/#introduction> (letzter Zugriff 14.03.2012)

W3C (2009): SKOS Simple Knowledge Organization System Namespace Document

Skos <http://www.w3.org/2009/08/skos-reference/skos.html> (letzter Zugriff 14.03.2012)

W3C (2011): W3C Semantic Sensor Network Incubator Group. URL: <http://www.w3.org/2005/Incubator/ssn/> (letzter Zugriff 14.03.2012)

Walter, K., Born, A. (2008): Positionierung und Sensor Web Enablement in Geosensornetzwerken. In: Technischer Bericht 2008, 7. GI/ITG KuVS Fachgespräch

Walter, K., Nash, E. (2009): Coupling Wireless Sensor Networks and the Sensor Observation Service – Bridging the Interoperability Gap, In: 12th AGILE International Conference on Geographic Information Science 2009, Hannover

Welt Online (2010): URL: <http://www.welt.de/die-welt/vermischtes/article7158533/Mindestens-neun-Tote-bei-Zugunglueck.html> (letzter Zugriff 14.03.2012)

Wikipedia (2012): Common Operational Picture. URL: http://en.wikipedia.org/wiki/Common_operational_picture (letzter Zugriff 14.03.2012)

Wikipedia (2012a): Crowdsourcing. URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Crowdsourcing> (letzter Zugriff 14.03.2012)

Winkemann, P., Blankenbach, J. (2011): Sensor Web im Zusammenspiel mit GDI am Beispiel der automatisierten Erstellung einer Temperaturkarte. In: Angewandte Geoinformatik 2011 - Beiträge zum 23. AGIT-Symposium, Salzburg

Zeit Online (2009) Nachterstedt. URL: <http://www.zeit.de/online/2009/30/ins-rutschen-gekommen> (letzter Zugriff 14.03.2012)

Anhang

→ Siehe beiliegenden Datenspeicher